

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

NÁVRH REGULACE TLAKU A PRŮTOKU V SOUSTAVĚ ČERPADLO-NÁDRŽ

PRESSURE AND FLOW RATE REGULATION DESIGN FOR PUMP-TANK SYSTEM

DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. Jiří Kovář

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. RNDr. Ing. Tomáš Březina, CSc.

BRNO 2013

Abstrakt

Dizertační práce je zaměřena na návrh regulace soustavy čerpadlo-nádrž jako součásti širší tlakové potrubní sítě pomocí mechatronického přístupu. Hlavním cílem je návrh regulace tlaku, průtoku a výšky hladiny v tlakové potrubní síti pro dodávku pitné vody pro město Vsetín. Tato tlaková potrubní síť sestává z různých prvků, jako je čerpadlo, potrubí, ventily, nádrže apod. Pro účely návrhu regulace je nutné vytvořit model soustavy, jehož řešení je založeno na gradientní metodě hydraulické analýzy. Gradientní metoda hydraulické analýzy, včetně modelů prvků soustavy, byla implementována do souhrnného softwarového řešení ADAM. Výsledky hydraulické analýzy musí odpovídat měřeným hodnotám na reálné soustavě. Z tohoto důvodu byla vytvořena metodika pro kalibraci a verifikaci potrubních sítí pro dodávku pitné vody. Daná metodika byla také implementována do aplikace ADAM. Na základě ověřeného modelu je možné navrhnout procesní pravidla pro popsanou potrubní síť. Tato procesní pravidla představují výstup z vyšší vrstvy řízení regulační soustavy (určují dobu běhu čerpadla, jeho otáčky apod.) Proces výběru pravidel byl definován jako optimalizační problém, k jehož řešení byl použit genetický algoritmus. Výsledky byly ověřeny pomocí výpočetního serveru ADAM Server, který byl vytvořen pro tento účel.

Klíčová slova

regulace soustavy čerpadlo-nádrž, gradientní metoda hydraulické analýzy, regulace tlaku, regulace průtoku, regulace výšky hladiny

Abstract

The thesis is focused on a regulation design of the pump-tank system as a part of a wider pressure pipeline network using the mechatronic approach. The main objective of the design is to regulate the pressure, flow and level in the pressure pipeline network for the supply of drinking water for Vsetín city. This pressure pipe network consists of various elements, such as a pumps, pipes, valves, tanks, etc. For the purpose of the regulation design, it is necessary to create a model of the system, whose solution is based on the gradient method for hydraulic analysis. Gradient method for hydraulic analysis, including the elements of the system, have been implemented into the general software solution ADAM. The results of the hydraulic analysis must match measured values on the real system. For this reason, the methodology was created for the calibration and verification of pipeline systems for the supply of drinking water. The methodology was also implemented into ADAM. On the basis of an verified model, it is possible to design procedural rules for that pipeline network. These rules represent the outputs from a higher control layer of regulatory system (they specify time to run the pump, its speed, etc.) The process of the rules selection was defined as an optimization problem, for whose solution genetic algorithm has been used. The results were verified using ADAM computing server that was created for this purpose.

Keywords

control of pump-tank system, gradient method of hydraulic analysis, pressure control, flow control, control of water level in tanks

Prohlášení o originalitě

Prohlašuji, že jsem dizertační práci vypracoval samostatně dle pokynů vedoucího a s použitím uvedené odborné literatury.

V Brně, dne 18. 2. 2013

Bibliografická citace

KOVÁŘ, J. *Návrh regulace tlaku a průtoku v soustavě čerpadlo-nádrž*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 80 s. Vedoucí dizertační práce prof. RNDr. Ing. Tomáš Březina, CSc.

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval prof. RNDr. Ing. Tomáši Březinovi, CSc. a doc. Ing. Vladimíru Habánovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při vypracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat za podporu, pomoc a spolupráci mým kolegům. V neposlední řadě chci vyjádřit svůj vděk mým nejbližším.

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Teoretická východiska, formulace problému a cíle práce.....	11
2.1	Teoretická východiska práce	11
2.2	Cíl práce	13
3	Rešeršní studie problematiky	14
3.1	Výchozí studie problematiky regulace ve vodovodních sítích	15
3.2	Metody hydraulické analýzy tlakových potrubních sítí	19
3.4	Návrh regulace s využitím hydraulického řešiče	21
4	Analýza a syntéza poznatků získaných na základě rešerše	24
4.1	Dílčí cíle práce	25
5	Metoda hydraulické analýzy	26
5.1	Gradientní metoda hydraulické analýzy	26
5.2	Gradientní metoda – matematický popis	27
5.3	Modely prvků sítě	31
6	Návrh a realizace softwarového řešení	35
6.1	Software Adam NV	36
6.2	Struktura softwaru.....	39
6.3	Výpočtové jádro softwaru ADAM	39
7	Tvorba modelu v softwaru ADAM	40
8	Model potrubní sítě Vsetín v aplikaci ADAM.....	44
8.1	Model vodovodního řadu města Vsetín	44
9	Kalibrace a verifikace modelu	46
9.1	Kalibrace modelu	46
9.2	Verifikace modelu	48
9.3	Implementace do aplikace ADAM.....	48
9.4	Použitý měřicí aparát	53
10	Ověření modelu potrubní sítě města Vsetín.....	55
10.1	Porovnání vypočtených a simulovaných hodnot	57
11	Návrh regulace.....	58
11.1	Simulační výsledky regulace	62
12	Ověření navržených procesních pravidel.....	64
12.1	Simulační ověření modelu	66
13	Přínosy práce	69
14	Závěr.....	70
	Seznam použité literatury.....	71
	Seznam obrázků	75
	Seznam tabulek.....	77
	Seznam příloh	78
	Příloha A – Doplnující data pro model potrubní sítě pro dopravu pitné vody Vsetín	79
	Přílohy B – Model obce Kateřinice	80
	Přílohy C – Sekveční diagram.....	81

1 Úvod

Kontinuální doprava jakéhokoliv plynného, kapalného nebo práškového média na velké vzdálenosti je z velké části prováděna za pomoci trubních sítí. Tento způsob dopravy je zejména výhodný tam, kde je předpoklad nepřetržitého a dlouhodobého používání, kde vznikla potřeba vysoké spolehlivosti a také šetrnosti vůči životnímu prostředí.

Náklady na tuto technologii jako celek je možno rozdělit do tří skupin. První skupinou jsou náklady na zřízení dopravní cesty, druhou skupinu tvoří náklady na provoz a poslední skupinu tvoří náklady na její údržbu. Provozní náklady jsou z velké části reprezentovány spotřebovanou elektrickou energií potřebnou k procesu čerpání a v průměru tvoří 85% celkových nákladů na celou technologii. Na čerpání kapalin v tlakových potrubních sítích je celosvětově vynakládáno přibližně 10% veškeré vyrobené elektrické energie. Z provedených technických auditů plyne, že je možné až 40% z této spotřeby ušetřit účinnější regulací provozu jak čerpadel, tak celé sítě. Možná úspora elektrické energie představuje spotřebu domácností jedné miliardy lidí [1], [2]. Jedním z důsledků uvedených skutečností je rostoucí důraz na šetrnost navrhovaných a provozovaných technologií vůči přírodě a jejím zdrojům a s rozvojem pokročilých technik řízení roste tlak na ekologičtější, energeticky šetrnější a tím i výhodnější provoz tlakových potrubních sítí.

Z hlediska regulace může být charakteristickým požadavkem na provoz sítě dosažení žádané výšky hladiny v nádrži nebo také žádaného tlaku a průtoku v určitých bodech soustavy. Proces takového regulace tlaku a průtoku v soustavě čerpadlo-nádrž, jako součásti tlakové potrubní sítě, je možné realizovat v zásadě dvěma způsoby – regulací otáček čerpadla, a to včetně jeho zastavení a rozběhu, a zavíráním nebo otevíráním ventilu. Oba způsoby regulace s sebou přinášejí několik výhod i nevýhod.

Obecnou výhodou regulace tlaku a průtoku v soustavě čerpadlo-nádrž naznačenými způsoby je jistě možnost automaticky reagovat na změnu požadavků provozu sítě, na možné poruchové stavy atd. Hlavní výhodou regulace změnou otáček čerpadla je bezesporu relativně bezztrátový provoz. Z technického hlediska je soustava rozšířena o další prostředky (např. frekvenční měnič), a tím jsou zvýšeny náklady na pořízení celé technologie, což je také hlavní nevýhoda tohoto přístupu. Regulace změnou otevření nebo uzavření ventilu může být z hlediska pořizovacích nákladů výhodná, nicméně jde většinou o ztrátový druh regulace.

Parametry regulační soustavy lze najít pomocí různých metod návrhu. Problematika návrhu vhodných parametrů regulační soustavy čerpadlo-nádrž je stále aktuální a rozvíjená, z velké části díky rozvoji možností výpočetní techniky, kdy návrh parametrů regulační soustavy je vytvořen na základě výsledků získaných z vhodného matematického modelu soustavy – tlakové potrubní sítě. Tato dizertační práce se zabývá návrhem soustavy pro regulaci závisle proměnných průtoku a tlaku v soustavě čerpadlo-potrubí-nádrž, která je součástí širší tlakové potrubní sítě.

2 Teoretická východiska, formulace problému a cíle práce

Návrh regulace pro soustavu čerpadlo-potrubí-nádrž, která je součástí širší tlakové potrubní sítě, je neustále studovaným problémem. Různá řešení jsou většinou poplatná danému typu soustavy, lze je načerpat z poměrně rozsáhlých, i když zatím neucelených informačních zdrojů. Z historického hlediska se tento typ problému za použití výše uvedených technických prostředků řešil od 40.ých let dvacátého století. Problematika regulace celé soustavy čerpadel a ventilů v širší tlakové potrubní síti mnohdy spadá právě do té oblasti vědeckého zájmu, který získá na aktuálnosti a důležitosti na základě nějaké, povětšinou energetické, krize. V literatuře se můžeme například dočíst, že řešená problematika napomáhá k nalezení cesty z ropné krize USA apod. Výzkum v této oblasti probíhal například v rámci armádních dotačních programů a výsledky výzkumu byly tudíž veřejnosti bohužel utajeny. Současným trendem, jak bylo řečeno výše, je zvýšení šetřivosti používaných technologií vůči přírodním zdrojům a jako takový je také podporován Evropskou unií. Základním směrem je důraz na zvýšení efektivity provozu již existujících tlakových potrubních soustav, na vývoj efektivnějších regulačních metod a jejich použití apod. K návrhu regulace průtoku a tlaku v soustavě čerpadlo-potrubí-nádrž je výhodné využít interdisciplinárních znalostí a dovedností.

2.1 Teoretická východiska práce

Návrh soustavy pro regulaci průtoku a tlaku v soustavě čerpadlo-potrubí-nádrž, jako součásti širší tlakové potrubní sítě, je z hlediska formulování obecného přístupu dlouhodobě řešeným vědeckým problémem. Tlakové potrubní sítě jsou z hlediska jejich matematického popisu komplexní nelineární soustavy, z čehož plynou i nároky na formulování výše zmíněné metodiky. Jednotlivá teoretická a praktická řešení se většinou omezují na předem definovanou soustavu, čímž jsou nároky na obecnost přístupu zmenšeny. Je-li ale tlaková hydraulická síť uvažována jako celek, lze na ni v určitých ohledech s výhodou pohlížet jako na mechatronickou soustavu.

2.1.1 Tlaková hydraulická potrubní síť jako mechatronická soustava

Mechatronika je interdisciplinární obor kombinující znalosti a dovednosti z oborů mechaniky, elektroniky, elektrotechniky, řízení a IT apod. s cílem využít jejich součinné kombinace. Mechatronika při návrhu jakéhokoli technického objektu představuje použití komplexního přístupu zajišťující průběžnou integraci požadavků na důležité vlastnosti jednotlivých prvků a vazeb u všech podsoustav technického objektu s důrazem na jeho vyrobitelnost, funkčnost, spolehlivost a v neposlední řadě také provozuschopnost. Obecná metodika, která v sobě zahrnuje výše uvedené, je zpracována v normě VDI 2006 Design methodology for mechatronics systems [3], [4].

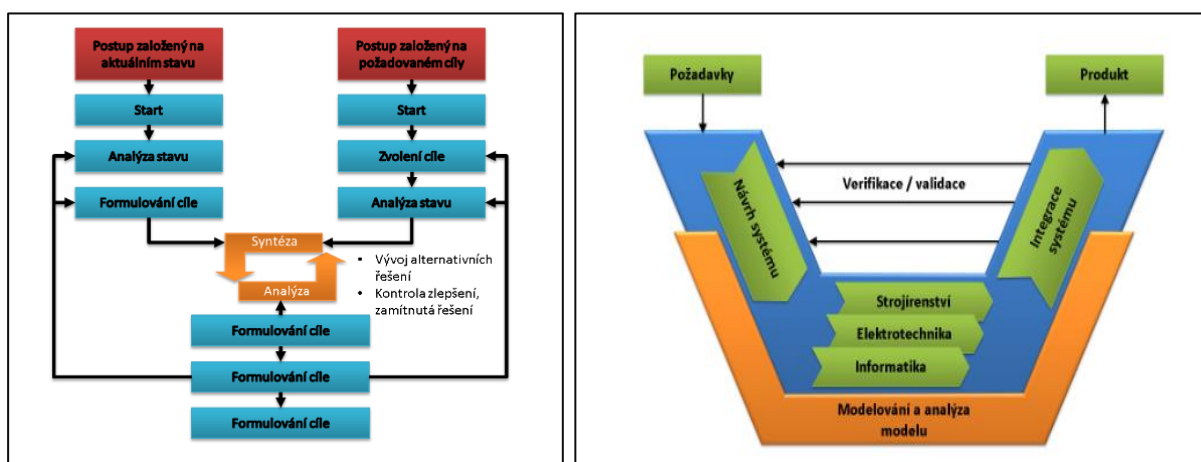
Metodika definovaná v normě VDI zavádí a používá flexibilní procedurální model za účelem návrhu mechatronických zařízení. Definované základní tři přístupy jsou:

- Řešení obecně formulovaného problému za pomoci tzv. **mikrocyklu** (Obr. 1 a). Postup řešení problému je rozdělen do série kroků, v kterých je možné pružně

reflektovat předem definované požadavky na vývojový proces. V této části řešení je možné také reagovat na často se nevyskytující dílčí problémové situace.

- Využití V-modelu (Obr. 1 b) jako **makrocyklu**. Jde o sérii na sebe logicky navazujících kroků, jejichž hlavním účelem je minimalizace nežádoucích mezních stavů, a to včetně rizikových faktorů při zachování funkčnosti a provozuschopnosti celého systému.

Konečným cílem této metodiky je funkční a prostorová integrace mechanických, elektrických a elektronických (případně jiných) jednotlivých komponent do výsledného mechatronického zařízení. Je nutné poznamenat, že mechatronická zařízení jsou komplexní soustavy vyznačující se úzkou provázaností samotného zařízení jako produktu s jeho vývojovou částí.



Obr. 1 a) Mikro-cyklus [5]; b) Makro-cyklus [5]

Obecný popis řešené tlakové potrubní sítě jako mechatronické soustavy

Soustava čerpadlo-nádrž se skládá z tří částí:

- **čerpadla** – různých typů (objemové, odstředivé, proudové apod.) a dále s konstantními nebo proměnnými otáčkami apod. Na sací části může být pomocí potrubí připojeno k nádrži, vrtu, rezervoáru apod., na výtlačné straně je obvykle potrubí.
- **výtlačného potrubí** – může být z různého materiálu, různé délky a průměru, obsahovat různé typy armatur apod.
- **nádrže** – slouží k uchovávání přenášeného média. Ve vodovodních sítích jsou také používány např. pro vyrovnání tlaků nebo tlumení pulsací.

Tlak a průtok je určen pracovním bodem soustavy, což je bod průniku charakteristiky čerpadla a charakteristiky soustavy, ke které je čerpadlo připojeno. Charakteristika soustavy se ale může v krátké době měnit v závislosti na několika faktorech. Regulačními prvky soustavy jsou hlavně:

- **čerpadla** – jeho otáčky mohou být regulovány např. frekvenčním měničem,
- **ventily** – mohou být regulovány jak ručně, tak například elektromagneticky, pomocí motoru apod.

Širší tlaková potrubní síť se skládá z akumulčních nádrží, vodojemů, rezervoárů, vrtů, odběratelů apod. Je monitorována a regulována různými elektrickými, elektromechanickými a mechanickými prostředky. Jako celek v jistém ohledu tvoří mechatronickou soustavu.

Konkrétní popis řešené tlakové hydraulické sítě jako mechatronické soustavy

V průběhu řešení nastíněné problematiky byl v rámci spolupráce s Ústavem vodního hospodářství Fakulty stavební VUT v Brně nastolen problém regulace tlaku, průtoku a výšky hladiny u provozované soustavy tlakové potrubní sítě pro dopravu pitné vody města Vsetín, konkrétně návrh soustavy pro regulaci tlaku, průtoku a výšky hladiny v soustavě Prameniště Ohrada - vodojem Bečevná - vodojem Rokytnice a vodojem IBV Ohrada (soustava bude podrobněji popsána níže) při uvážení vlivu celé sítě. Uvedená hydraulická soustava obsahuje několik čerpadel, ventilů, potrubí, odboček apod. a jejím hlavním účelem je nepřetržitá dodávka pitné vody spotřebitelům. Celá uvedená soustava je monitorována a řízena pomocí SCADA systému za účelem dodání požadovaného množství vody, udržování předepsaných výšek hladin v akumulčních vodojemech a sledování požadovaných tlaků a průtoků ve stanovených místech tlakové hydraulické sítě. Jak je řečeno výše, tlaková hydraulická síť jako technická soustava obsahuje různé technické prostředky, což při použití uvedené metodiky vyžaduje vymezení a formulaci problému a cíle práce.

2.2 Cíl práce

Při provozu jakékoliv tlakové potrubní sítě pro dodávku pitné vody spotřebitelům jsou sledovány tři priority:

- spolehlivost dodávky pitné vody – je nutné dodržet co možná nejméně přerušovanou dodávku pitné vody,
- jakost vody – pitná voda nesmí být znečištěna, z hlediska regulace se v rámci sítě tvoří ve vodojemech zásoby maximálně na dva dny,
- cena řešení (investice, provoz, údržba) – s cílem snížit celkové náklady na technologii.

Hlavním cílem dizertační práce je návrh regulace tlaku, průtoku a výšky hladiny v soustavě Prameniště Ohrada – vodojem Bečevná – vodojem Rokytnice a vodojem IBV Ohrada tak, aby byla zachována spolehlivost soustavy při částečném výpadku dodávky pitné vody z přehrady Karolinka. Po vymezení problému je nutné jeho řešení založit na základě rešeršní studie dané problematiky.

3 Rešeršní studie problematiky

Jak je řečeno výše, návrh parametrů regulace soustavy čerpadlo-nádrž je komplexní problém, při jehož řešení se využívá jak pokročilých technik a metod návrhu parametrů regulační soustavy pomocí metod automatizace, tak i výrazného posunu v možnostech řešení matematických modelů tlakových potrubních sítí. Zvolení vhodné metody návrhu parametrů regulační soustavy závisí na vymezení funkčních požadavků na soustavu a na prvcích, které soustavu tvoří. Složitost problému návrhu parametrů regulační soustavy narůstá také proto, že tlak a průtok jsou závislé proměnné. Samotný návrh parametrů je za další závislý také na rozlehlosti soustavy tlakové hydraulické sítě, která je brána v úvahu. Tlakové potrubní sítě, a tím i použité metody návrhu parametrů regulační soustavy, lze mimo jiné dělit dle jejich rozlehlosti na malé a velké (Obr. 2) nebo například dle typu přenášeného média (vodovody, parovody, plynovody apod.). Protože popsaná síť města Vsetína slouží k dopravě pitné vody, bude rešeršní studie omezena právě na tento typ tlakové potrubní sítě.

Základním účelem potrubních sítí je doprava pitné vody od zdroje, který je povětšinou představován jako prameniště, přírodní nádrž, vrt, puklinová podzemní voda apod. ke spotřebiteli. Potrubní sítě pro dopravu pitné vody jsou obvykle složeny z poměrně velkého množství potrubí (v Brně například přibližně 1350km potrubí), která navzájem pospojována tvoří tlakové pásma, která jsou různými funkčními prvky od sebe oddělena (většinou ventily). Požadovaný přetlak v potrubní síti je zajišťován čerpadly, respektive čerpacími stanicemi nebo příslušným vodojemem. Regulace je prováděna změnou otáček, vypnutím/zapnutím čerpadla nebo uzavřením/otevřením ventilu. Zásah je zpravidla proveden automaticky nebo operátorem z dispečinku prostřednictvím SCADA systému.

V posledních dvaceti až třiceti letech, s tím jak narůstá komplexnost hydraulických soustav, je hledisko šetrnosti provozu z pohledu operátora těžce dosažitelné jen díky jeho zkušenostem. Je tedy obecnou snahou vytvořit vyšší vrstvu řízení vodovodní řadu takovou, která by mohla na základě aktuálního stavu vodovodního řadu vygenerovat požadovaný regulační zásah.



Obr. 2 a) Model potrubní sítě Wolf-Cordera Ranch, Colorado Springs [6]; b) Model malé potrubní sítě [7]

3.1 Výchozí studie problematiky regulace ve vodovodních sítích

Z regulačních úloh, které jsou používány v odvětví hydraulických soustav, je bezpochyby nejrozšířenějším a také nejstarším typem regulace na výšku hladiny v nádrži. Regulace tlaku a průtoku v hydraulických soustavách, resp. metody návrhu a použité prostředky, jsou ale neustále rozšiřujícím a studovaným problémem. Navrhované regulační soustavy jsou používány nejen na regulaci výšky hladiny, tlaku nebo průtoku, ale také pro návrh časového rozložení funkčnosti čerpadel vzhledem k ceně jejich provozu apod. Dále je možné najít metody návrhu, jejichž úkolem je mimo jiné reagovat na havarijní stavy sítě atd. Jak bylo řečeno výše, jsou metody návrh závislé na velikosti regulované soustavy, která je brána v úvahu.

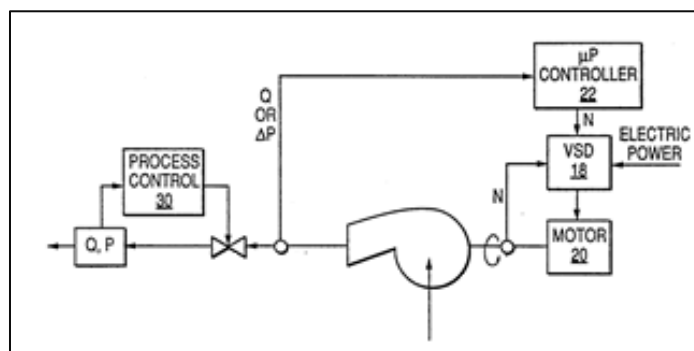
Jde-li o návrh parametrů regulační soustavy vzhledem k čerpadlu, popř. čerpadlo-krátká část výtlačného potrubí, bez uvážení případných dalších částí sítě, je používaná problematika poměrně dobře zpracována a některé přístupy jsou také patentovány:

- americký patent č. 5 240 380 [8] - ukazuje přístup pro regulaci průtoku a tlaku v soustavě čerpadlo-krátká část výtlačného potrubí. Regulace tlaku a průtoku je v tomto případě prováděna změnou otáček čerpadla a mírou otevření/uzavření regulačního ventilu (viz. Obr. 3),
- americký patent 8 019 479 [9] – představuje řídicí algoritmus pro čerpadlo s proměnnými otáčkami primárně za účelem konstantního nebo požadovaného průtoku.

Dále také:

- americký patent 3 918 831 [10] – představuje regulační mechanismus pro zajištění konstantního průtoku,
- americký patent 200 400 642 92 A1 [11] – představuje řídicí systém pro soustavu odstředivých čerpadel,
- americký patent 425 774 5 A [12] – představuje automatický řídicí systém pro odstředivá čerpadla.

Z použitých metod návrhu parametrů regulátoru lze zmínit např. metodu Zieger-Nichols, dále použití heuristických metod hledání parametrů, např. genetických algoritmů, diferenciální evoluce, dále neuronových sítí apod. Je-li brána v úvahu širší soustava čerpadlo-výtlačné potrubí-nádrž jako součást rozlehlé potrubní sítě (což je v praxi patrně nejrozšířenější), je situace z hlediska návrhu složitější.

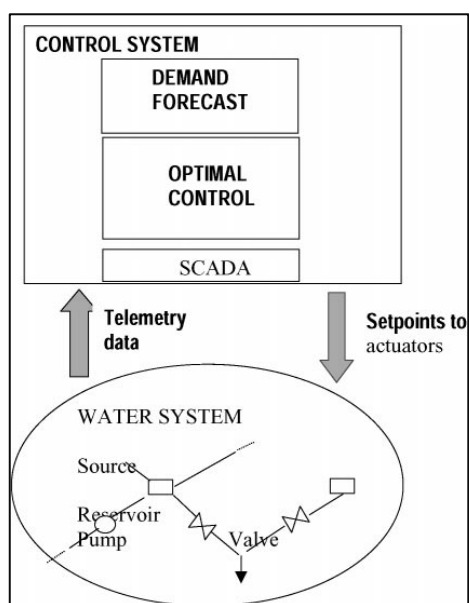


Obr. 3 US Patent č 5 240 380 [8]

Problematika návrhu řízení a provozu regulovatelných prvků v soustavě čerpadlo-potrubí-nádrž, jako součásti rozlehlé tlakové hydraulické sítě, je studována přibližně od roku 1968, přičemž obecná metodika návrhu do dnešní doby není vytvořena. Tato skutečnost je také důsledkem různorodosti hydraulických soustav. Obecná struktura řídicí soustavy byla definována např. v práci Cembrana a kol. [13]. Struktura byla rozdělena na dvě části, později rozšířením o SCADA systém na tři vzájemně propojené části (Obr. 4):

- **Hydraulická síť** (DWDS - Drinking Water Distribution System): obecně jde o hydraulickou síť sloužící k dopravě nějakého média, v tomto případě pitné vody. Obsahuje regulovatelné prvky, jako jsou čerpadla, ventily apod.
- **Nižší vrstva řízení – SCADA** (Supervisory Control And Data Acquisition): hierarchicky jde nižší formu řízení; jedná se o systém, pomocí kterého lze monitorovat a řídit technologické procesy. Na této úrovni je realizováno řízení ventilů, šoupátek a čerpadel například pomocí PLC.
- **Vyšší vrstva řízení - Control system**: je nejvyšší vrstva regulace hydraulické sítě. Výstupem z této vrstvy jsou požadavky na např. míru otevření/uzavření ventilů, otáčky nebo zapnutí/vypnutí čerpadla apod. Ty potom realizuje nižší vrstva řízení použitím například nějakého SCADA systému.

Tento způsob rozdělení zajišťuje jistou míru unifikace prostřední pro vyšší vrstvu řízení.



Obr. 4 a) Obecná struktura regulační soustavy [13] (podobně [14])

Právě struktura a metody použité k vytvoření vyšší vrstvy řízení hydraulické soustavy jsou v dnešní době nejvíce studovaným problémem. I když sjednocující metoda není ještě definována, jsou vytvořeny alespoň rámcové způsoby řešení dané problematiky, které se vyvíjejí již od prvních studií. Tyto první, ale také pozdější práce, formulují návrh parametrů regulační soustavy a její provoz jako optimalizační problém, přičemž studie samotné lze rozdělit dle jejich přístupu k řešení do dvou skupin. První skupina prací nějakým způsobem používá hydraulický řešič, druhá skupina potom používá jiné přístupy. Z druhé skupiny prací lze například uvést studii pánů Lai a Schaake [15] nebo Kohlhaas a Mattern [16] a navazující práce. Například tyto dvě práce definují metody při předpokladu, že tlak v potrubní síti je

konstantní, což výslednou metodu návrhu omezuje vzhledem k jejímu opakovanému použití.

V první skupině prací je používán nějaký typ hydraulického řešiče. Právě s rozvojem hydraulických řešičů došlo také k rozvoji přístupů k návrhu parametrů regulace soustavy. Původně se tyto studie zabývaly návrhem celé sítě a optimalizací rozložení a připojení jejich prvků, a to včetně regulačních prvků. Za stěžejní práci lze patrně označit práci pánů Alperovits a Shamir [17], která se zaměřuje hlavně na návrh celé potrubní sítě a dále návrhu provozu sítě. Provozem sítě se v tomto případě myslí návrh pracovních bodů čerpadel, k jejichž získání byla použita metoda LPG (linear programming gradient). Také zde byla patrně poprvé brána v úvahu změna průtoku v modelu sítě. Složitější ze dvou studovaných modelů sítě obsahoval jedno čerpadlo, kterým bylo přenášeno médium transportováno z jedné nádrže do druhé přes zokruhovanou potrubní síť. Nicméně v jejich práci a hlavně v následné diskuzi je řečeno, že jejich metoda nemůže být ještě použita pro navržení pracovních bodů čerpadel.

Uvedená a také další navazující práce definovaly metodu pro návrh regulace jako optimalizační problém. S rozvojem výpočetní techniky a možností použití hydraulických řešičů byly i zlepšovány metody pro návrh provozu čerpadel v potrubní síti vzhledem k ceně provozu soustavy. Hlavním parametrem k optimalizaci bylo stanovení pracovních bodů čerpadel, časového rozložení funkčnosti, nebo v případě více čerpadel časového rozložení funkčnosti čerpadel vzhledem k ceně jejich provozu při zachování požadovaného průtoku a tlaku v hydraulické soustavě. Optimalizační úloha může být zadána například jako [18]:

$$\text{Minimize} \quad F(x:q,p) \quad (1)$$

Subject to

$$\begin{aligned} q(x) \\ p(x) \\ x_{\min} < x < x_{\max} \end{aligned} \quad (2)$$

kde $F(X;q,p)$ je účelová funkce, jejíž minimum se hledá a představuje cenu provozu čerpadel pro dané časové rozložení jejich funkčnosti. Omezení potom tvoří vektor průtoků $q(X)$ a vektor tlaků $p(X)$ (většinou minimálních tlaků). Uvedené tři funkce jsou funkce rozhodovací proměnné X , což je vektor nezávislých rozhodovacích proměnných. Ze studií, které se zabývají optimalizací chodu čerpadel v soustavě čerpadlo-nádrž, lze uvést například práci Ertina a kol. [19]. Regulace soustavy zde spočívala v udržení požadované výšky hladiny v nádrži, nicméně, jak uvádějí, je možné přidat omezující pravidla z důvodu udržení požadovaného tlaku v potrubí v předem stanoveném intervalu. V dalších studiích, které jsou formulovány stejně nebo podobně pomocí (1) a (2), se rozhodovací proměnná dá rozdělit do dvou kategorií:

- **Turn on/off schedule** (Obr. 5): v tomto případě je rozhodovací proměnná X vektor vektorů, definujících časové rozložení funkčnosti jednotlivých čerpadel.
- **Schedule**: v tomto případě je rozhodovací proměnná vektor vektorů definujících časové rozložení funkčnosti jednotlivých čerpadel, včetně jejich otáček, podobně je definován časové rozložení míry otevření/uzavření ventilů atd.

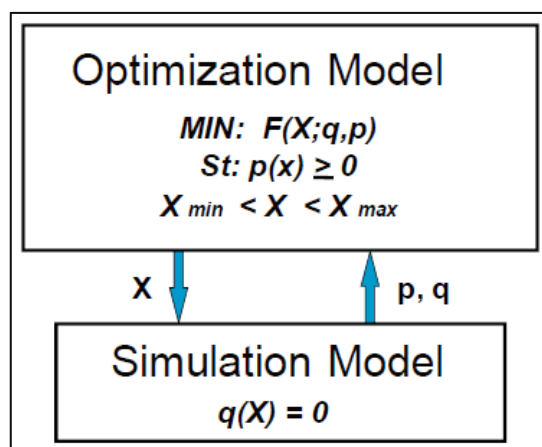
Souhrnně se dá vektor X označit za hledaná procesní pravidla.

Pump 1						
Pump 2						
Pump 3						
Pump 4						
Pump 5						
Pump 6						
Time	0 – 4 hrs	4 – 8 hrs	8 – 12 hrs	12 – 16 hrs	16 – 18 hrs	18 – 24 hrs

Obr. 5 Ukázka nalezeného řešení pro hydraulickou soustavu z [18]

Na Obr. 6 je zobrazena obecná struktura metody optimalizace, která je používána v oblasti regulace tlakových potrubních sítí. Postup je následující.

Pomocí optimalizačního modelu je zvolen vektor X a je vstupem do simulačního modelu, který na jeho základě vypočítá průtoky a tlaky. Tyto jsou vráceny k ohodnocení do optimalizační metody. Pokud vypočítané tlaky a průtoky odpovídají zadaným omezením, je vektor X vyhodnocen jako vyhovující a uložen (i s vyčíslením své účelové funkce). Vektor X v tomto případě představuje hledaná procesní pravidla. Jak bylo řečeno výše, studie se liší primárně v tom, zda je pro optimalizaci použit hydraulický řešič či nikoliv. Protože typ optimalizace, která používá hydraulický řešič převládá, bude další rešerše soustředěna právě na tento přístup.



Obr. 6 Obecná struktura optimalizace pro účely návrhu parametrů regulační soustavy [18]

Hydraulický řešič, tedy algoritmizovaná metoda pro analýzu průtoku a tlaku v tlakové hydraulické potrubní síti, je podstatnou částí celé metody návrhu. Z tohoto důvodu je nutné vytvořit alespoň krátký přehled existujících hydraulických řešičů, použitých metod apod.

3.2 Metody hydraulické analýzy tlakových potrubních sítí

K modelování potrubní sítě, respektive k získání základních hydraulických veličin v jednotlivých významných částech sítě (rychlost proudění, průtok, tlak/tlaková ztráta) řešením soustavy rovnic, je nutné definovat matematickou reprezentaci prvků tvořících tuto síť a definovat vhodnou metodu výpočtu vytvořeného matematického modelu. Takovému modelování sítě potom říkáme hydraulická analýza, která vzhledem k časovému kroku simulace a také celkové době řešení může být dělena na:

- **statickou:** je uvažován neměnný stav zatížení sítě a hledá se řešení pro jeden časový okamžik (ustálené proudění),
- **kvazi-dynamickou:** (větší časové kroky v řádu sekund nebo minut) (někdy také pojmenované jako kvazi-statickou) – jde o posloupnost statických hydraulických analýz, kdy výstup jedné analýzy je vstupem druhé,
- **dynamickou:** (malé časové kroky v řádu milisekund nebo sekund) účelem dynamické analýzy je řešit model pro relativně krátké časové okamžiky, což je výhodné například pro studium přechodových jevů (hydraulický ráz apod.)

Pro modelování větších potrubních sítí pro delší časové úseky řešení bývají používány kvazi-dynamické (kvazi-statické) hydraulické řešiče. Uvažováno je proudění jako jednorozměrné. Z používaných metod pro kvazi-dynamickou hydraulickou analýzu lze uvést hlavně tyto metody:

- **Hardy Cross metoda:** byla vyvinuta pro analýzu průtoku a tlaku v okružových potrubních sítích. Teoreticky byla první popsána Crossem v roce 1936 [20]. S využitím počítačů zažila svůj rozmach v 60. letech dvacátého století, algoritmus byl popsán Adamsem v roce 1961.
- **Newton-Raphson metoda:** nahradila Hardy-Crossovu metodu. Tato metoda byla oproti své předchůdkyni použitelnější (stabilnější i pro složité soustavy) a rychleji konvergovala. Poprvé byla patrně popsána Martinem a Petersem v roce 1963, vylepšení potom představili v roce 1967 Dillingham a následně v roce 1972 Shamir a Howard [21].
- **Linearizační metoda:** McIlroy (1949), Fietz v roce 1973 [22], Wood a Charles v roce 1972 a 1973 atd.

Je nutné podotknout, že pod pojmem hydraulický řešič rozumíme také metodu, která řeší nelineární rovnice popisující soustavu. První rozdílem mezi hydraulickými řešiči je způsob sestavení rovnic. Tyto rovnice většinou nelze řešit exaktně, proto jsou používány numerické metody a v právě ve způsobu hledání řešení soustavy těchto rovnic se uvedené metody také liší. V průběhu posledních 40ti let minulého století se uvedené metody zlepšovaly a ověřovaly. Jejich vývoj lze najít např. v pracích pánů Epp a Fowler [23], Hamam a Brameller v roce 1971 [24], Wood a Charles [25], kteří mimo jiné vyvinuli nový (resp. vylepšili) algoritmus. Tyto práce sestavovaly linearizované rovnice pro výpočet tlaku a průtoku na základě okružové podmínky. Druhý způsob, totiž sestavení rovnic vzešlých z uzlových podmínek, zvolil např. Shamir a Howard [21]. Dále Chandrashekar (1980) [26] a Jeppson a Davis (1976) [27], kteří vypracovali techniku pro modelování netrubkových prvků sítě (čerpadla, ventily) a konečně v roce 1977 představili Rao a Bree [28] tzv. EPS (extended period analysis). V roce 1984 Todini a Pilati [29] představili nový způsob řešení těchto rovnic

založený na gradientní metodě (pojmenování Todini-Pilati metoda, se oproti očekávání nerozšířilo). Gradientní metoda hydraulické analýzy vykazuje rychlejší konvergenci a větší stabilitu a v současné době je patrně nejpoužívanější metodou. Metody byly porovnávány například v práci [30]. K matematickému vyjádření soustavy rovnic jsou v těchto případech používány matice, zvláště pak u rozsáhlejších sítí to jsou tzv. řídké matice (sparse matrix). Rozvoj metod řešení řídkých matic rovněž nemalou měrou přispěl k rozšíření metod hydraulické analýzy. Se vznikem algoritimizovaného řešiče a dále také v důsledku rozšíření výpočetní techniky se rozšířilo použití hydraulických řešičů i pro off-line (a později i on-line) regulaci reálných hydraulických potrubních sítí. Mezi jinými lze zmínit Brdys (1994) [31], Coulback (1975) [32] atd.

Z komerčně rozšířených softwarových řešení pro hydraulickou analýzu průtoku a tlaku v potrubních sítích lze uvést například uvést:

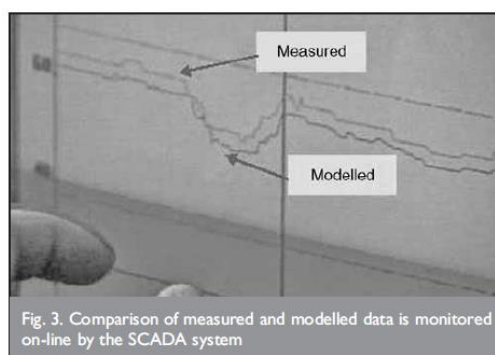
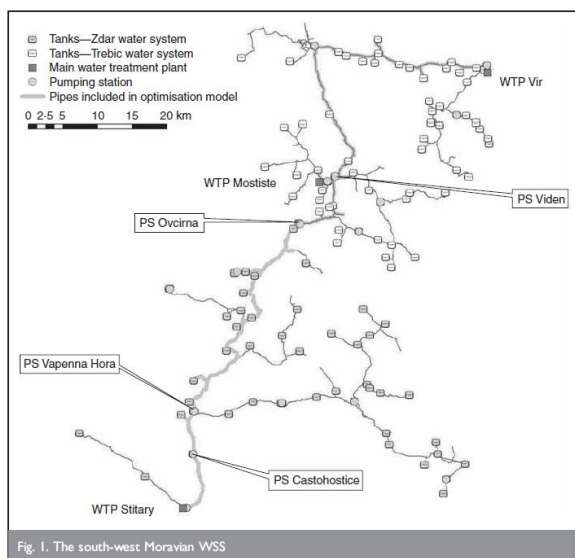
- **KYPipe** – je poměrně rozsáhlé softwarové řešení firmy KYPipe LCC (z hlediska funkčnosti) s možností dokoupení různých modulů. Bohužel není možné z vnějšku zasáhnout do výpočtu.
- **MIKE NET** – je software navržený firmou DHI pro modelování potrubních sítí. Softwaru má širokou podporu a použitelnost, nicméně nedovoluje kontrolovat výpočet.
- **EPANET** – je software navržený a používaný pro modelování i rozlehlých potrubních sítí. Použití z hlediska výpočtu je výborné, avšak konkrétnější zásahy do výpočetních kroků nedovoluje.
- **MATLAB/SimHydraulics** – je součástí produktového portfolia firmy MathWorks. Je používán na modelování poměrně malých hydraulických sítí a hydraulických okruhů strojů. Při použití pro modelování rozlehlejších sítí bohužel příliš vhodný není, i když je z hlediska zásahu do výpočtu dobře použitelný.

3.4 Návrh regulace s využitím hydraulického řešiče

Aktuální práce zaměřené na regulaci průtoku a tlaku v soustavě čerpadlo-potrubí-nádrž lze vždy spojit s jistým hydraulickým řešičem a někdy také s celým softwarovým řešením, což je patrně důsledek složitosti řešeného problému. Problém návrhu parametrů regulace s využitím hydraulického řešiče dále mimo jiné vyžaduje několik na sebe navazujících kroků. Problematika off-line regulace čerpadel za účelem plnění nádrží je dobře popsána např. práci pánů Farmani, Ingeduld, Savic, Walters, Svitak a Berka [33], která si kladla za cíl navrhnout vhodný způsob regulace pro dvě rozlehlé tlakové hydraulické sítě pro dopravu pitné vody v oblasti Žďárska a Třebíče v ČR. Hlavním cílem jejich práce bylo navrhnout procesní pravidla pro všechna čerpadla v hydraulické potrubní síti (Obr. 7) s předem danými omezeními.

Pro účely regulace je nutné mít model tlakové potrubní sítě takový, aby vypočítané hodnoty průtoku a tlaku odpovídaly těm měřeným. Úpravu modelu za tímto účelem se souhrnně říká kalibrace a verifikace modelu. Jak je v [33] ukázáno, je proces kalibrace a verifikace modelu pro účely věrohodné predikce hodnot poměrně náročný proces. Představený model je vytvořen v softwaru MIKE NET (software pro kvazi-dynamickou analýzu hydraulických sítí). Model byl následně upravován pro účely predikce (Obr. 7).

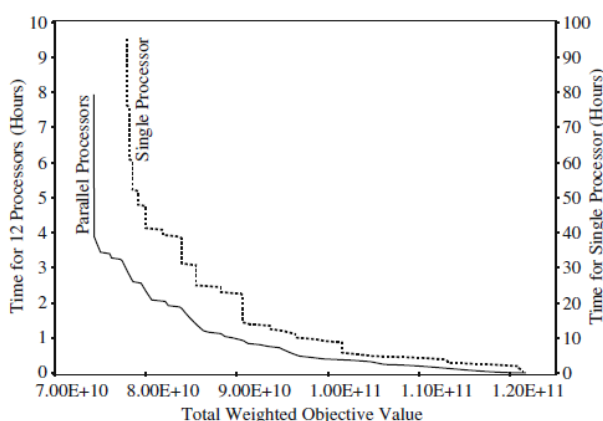
Účelem návrhu regulačních pravidel byla úspora elektrické energie vhodným rozložením pracovní funkčnosti čerpadel při zachování podmínky minimálního tlaku v uzlech sítě a výšky hladiny v nádrži. Hledání regulačních pravidel bylo v tomto případě vyřešeno za použitím evolučních algoritmů. Výsledkem je méně rozhodovacích situací pro jednotlivé operátory uvedených potrubních sítí, úspora elektrické energie a ekonomičtější provoz celé technologie. Jak autoři práce uvádějí, nejpracnější bylo vytvoření modelu potrubní sítě a jeho kalibrace a verifikace vzhledem k provedeným měřením. Na Obr. 7 je znázorněno on-line srovnání měřené a vypočítané hodnoty. Měření bylo prováděno on-line pomocí SCADA systému. Popis použité metody pro návrh regulačních pravidel nebyl v této práci bohužel uveden (stejně jako nejsou uvedeny podrobnosti o jakékoliv jiné použité metodě).



Obr. 7 a) Zobrazení modelu potrubní sítě pro oblast Žďárska a Třebíčska. Celá síť měří 550 km a zásobuje pitnou vodou 180 000 obyvatel [33] b) Porovnání měřených a vypočtených hodnot [33]

Cílem je tedy vytvoření vektoru X tak, aby bylo dosaženo požadavků vzhledem k tlaku, průtoku a výšce hladiny v soustavě. Vektor X je vyvolán na základě zpracované vyjímky, které byly studovány např. v práci pana Jamiesona a kol. [35]. Tlak a průtok jsou závislé proměnné a právě nadměrný odběr přenášeného média ze soustavy může způsobit pokles tlaku. Jako příklad si lze představit nadměrný odběr z důvodu odběru zásahových jednotek při požáru apod. Jako klíčový požadavek na vyšší vrstvu řízení soustavy Jamieson definuje schopnost on-line zásahu jako reakci na krátkodobé změny při zachování krátkodobých a dlouhodobých požadavků na provoz sítě.

Způsobů návrhu vyšší vrstvy řízení je možné v literatuře najít v poměrně dostatečném množství. Například Murphy [36] využívá genetických algoritmů, s přihlédnutím ke kvalitě vody například Sakarya [37], dále Omsbee [38], Zyl [39], Goldman [40] atd. On-line regulaci potom řešil ve své práci Tsai [41].



Obr. 9 Čas potřebný pro výpočet regulačních pravidel X [41]

Pro on-line regulaci, jak uvádí ve své práci Tsai, je klíčovým problémem vytvoření regulačních pravidel v relativně krátkém čase. Z hlediska složitosti modelu jednotlivých soustav, době simulace a simulačním kroku je hledání regulačních pravidel časově náročný proces v důsledku také toho, že hledání vektoru X se děje opakovaným spouštěním simulace modelu soustavy (Obr. 9).

Návrh regulace průtoku, tlaku a výšky hladiny v tlakové potrubní síti z hlediska vyšší vrstvy řízení je problém návrhu vhodných akčních zásahů (vektoru X) na základě odpovídajícího modelu regulované soustavy. Vytvoření vektoru X je obvykle převedeno na optimalizační problém, k jehož řešení jsou s výhodou používány evoluční algoritmy.

4 Analýza a syntéza poznatků získaných na základě rešerše

Na základě mechatronického přístupu aplikovaného na problematiku regulace tlaku, průtoku a výšky hladiny v soustavě čerpadlo-potrubí-nádrž byla vytvořena rešeršní studie. Problematiku mechatronického návrhu soustavy pro regulaci průtoku, tlaku a výšky hladiny v soustavě čerpadlo-nádrž, lze rozdělit do dvou skupin, kdy je brána do úvahy soustava:

- čerpadlo-krátká část výtlačného potrubí,
- čerpadlo-výtlačné potrubí-nádrž, jako součást širší potrubní sítě, kdy charakteristika soustavy a tedy i pracovní bod se mění v závislosti na dění v soustavě jako celku.

Pro první skupinu, tu která neuvažuje dění v soustavě jako celku, lze najít příslušnou metodiku přístupu, a to včetně patentových řešení. Druhá skupina je aktuálně řešeným problémem, kdy je úloha regulace převedena na optimalizační problém, a dělí se do dvou skupin:

- skupina metod, které nevyužívají k řešení hydraulický řešič a
- druhou skupinu, které používají nějaký typ hydraulického řešiče.

Přičemž nejvíce používaným přístupem je druhá skupina, která umožňuje vyšetřovat stavy v celé soustavě a tím například dobře určit pracovní bod čerpadel nebo také přesnější určení otáček čerpadla a míru otevření a uzavření/otevření ventilu v čase. Nižší vrstva řízení má potom za úkol tento časový předpis otáček a uzavření/otevření realizovat. Tyto metody návrhu využívají hydraulické řešiče různých typů, přičemž nepoužívanější jsou založeny na metodách:

- Hardy-Cross,
- Newton-Raphson,
- linearizační metody,
- gradientní metoda.

Gradientní metoda je v současné době nepoužívanější metodou a stala i se základem pro komerční výpočtové programy. Při použití řešiče lze vhodnou optimalizační metodou navrhnout pracovní režimy regulovatelných prvků v čase (tedy vytvořit vektor X), přičemž

- je nutné tuto optimalizaci pro účely on-line regulace realizovat poměrně rychle a
- musí být odpovídat zadaným omezením.

4.1 Dílčí cíle práce

Dílčí cíle je tedy možné zformulovat takto:

- vytvořit model regulované soustavy,
- tento model podrobit kvazi-statické hydraulické analýze, na jejímž základě je nutné
- definovat požadavky na tento model vzhledem k reálnému použití sítě.

Dále je nutné takto vytvořený model

- kalibrovat a
- verifikovat.

Dále navrhnout a realizovat metodu návrhu procesních pravidel na základě:

- vytvořeného modelu a
- požadavků definovaných v kapitole 2.2.

5 Metoda hydraulické analýzy

Pro vytvoření modelu soustavy byla zvolena gradientní metoda kvazi-statické hydraulické analýzy. Vyznačuje se poměrně rychlou konvergencí a stabilitou výpočtu. Při výběru vhodné implementace této metody bylo vyzkoušeno několik jiným možných přístupů:

- **MATLAB SimHydraulics¹** – pro složitější hydraulickou soustavu aplikace vykazovala nestabilní chování.
- **KYPipe²** – nelze jednoduše připojit k jinému softwarovému řešení pro účely návrhu procesních pravidel.

V důsledku výše uvedeného a také z důvodu nutnosti plně kontrolovat jednotlivé kroky simulace a tím dosáhnout kontroly nad výpočtem byla zvolena možnost vlastní implementace gradientní metody.

5.1 Gradientní metoda hydraulické analýzy

Gradientní metoda hydraulické analýzy je metoda, která iterativním procesem hledá řešení soustavy rovnic vytvořených pomocí uzlové a hydraulické podmínky [29][30][42]. V maticové podobě je problém definován jako:

$$\mathbf{A}_{12}\mathbf{H} + \mathbf{K}(\mathbf{Q}) = -\mathbf{A}_{10}\mathbf{h}_0 \quad (3)$$

$$\mathbf{A}_{21}\mathbf{Q} = \mathbf{q} \quad (4)$$

kde \mathbf{A}_{12} ($=\mathbf{A}_{21}^T$) je matice incidence neznámých tlaků v uzlech sítě, \mathbf{A}_{10} je matice incidence známých (neměnných) uzlových tlaků, \mathbf{Q} je vektor průtoků v jednotlivých potrubích, \mathbf{q} je vektor tzv. předepsaných průtokových odběrů v uzlech sítě, \mathbf{H} je vektor neznámých tlaků v uzlech sítě, \mathbf{h}_0 je vektor známých (neměnných) tlaků v uzlech sítě a $\mathbf{K}(\mathbf{Q})$ reprezentuje tlakové ztráty (nebo zisky) v úsecích modelu sítě závislé na průtoku.

Skeletonizace – 1. část

Z definice této metody je zřejmé, že model sítě musí být rozdělen na části. Tento proces se nazývá skeletonizace a dělí model potrubní sítě na uzly a úseky. Za uzly lze považovat prvky sítě jako nádrž, vodojem, spojení potrubí apod., přičemž je navíc rozlišujeme na odběrové uzly (zde dochází k odběru přenášeného média ze sítě) a uzly reprezentující zdroje jako jsou jezera, řeky, nádrže apod. Za úseky jsou považovány prvky jako potrubí, čerpadlo apod. souhrnně tedy prvky, jejichž hlavní účelem je doprava přenášeného média [43].

¹ Firma MathWorks

² Firma KYPipe LLC

5.2 Gradientní metoda – matematický popis

Jak je řečeno výše, model je skeletonizován na uzly a úseky. Pro každý i -tý uzel lze psát uzlová podmínka [44][45][46]:

$$\sum_j Q_{ij} - q_i = 0 \quad (5)$$

kde Q_{ij} značí přítok (se znaménkem +) a odtok (se znaménkem -) z každého bezprostředně přiléhajícího uzlu j a q_i značí odběr z uzlu. Pro každý úsek, který je vždy definován mezi dva uzly, platí [44][45][46]:

$$h_{ij} = H_i - H_j = K_{ij} Q_{ij}^n \quad (6)$$

kde h_{ij} je tlaková ztráta (nebo zisk v případě čerpadla) mezi uzly i a j , K_{ij} je ztrátový koeficient a n je průtokový exponent. Rovnice (6) vyjadřuje vztah mezi tlakovou ztrátou a průtokem. Pokud je součástí úseku i prvek, který zvyšuje tlakovou ztrátu celého úseku (například zúžení, koleno apod.), je k pravé straně rovnice přičten člen $m Q_{ij}^2$, kde m je ztrátový koeficient tohoto prvku (viz. dále). Rovnice (6) platí pro všechny úsek obecně, vyjma úseku modelu reprezentující čerpadlo, pro které platí [45][46]:

$$h_{ij} = H_i - H_j = -\omega^2 \left(h_{\max} - K_c (Q_{ij} / \omega)^n \right) \quad (7)$$

kde ω jsou otáčky čerpadla, h_{\max} je dodaná tlaková výška čerpadla při nulovém průtoku a K_c je směrnice získána pomocí Q-H charakteristiky.

Obecný popis metody je uveden v rovnicích (3) a (4). Todini a Pilati ve své práci ukázali, že nutnou podmínkou pro konvergenci metody je mimo jiné splnění podmínky rovnováhy v uzlech. Maticově zapsáno jako (celé odvození zde nebude uvedeno, jen podstatné části) [44][45][46]:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_{10} h_0 \\ q \end{bmatrix} \quad (8)$$

kde matice A_{12} je matice incidence uchováající topologii *úsek-uzel s neznámým tlakem*. Na každém řádku má jenom dva nenulové elementy. Platí, že:

$$A_{12}(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{pokud } i\text{-tý úsek končí v } j\text{-tém uzlu} \\ -1 & \text{pokud } i\text{-tý úsek začíná v } j\text{-tém uzlu} \\ 0 & \text{v každém jiném případě} \end{cases} \quad (9)$$

a má rozměr $NU_S * (NU - NU_O)$, kde NU_S je počet úseků, NU počet uzlů a NU_O je počet uzlů se známým tlakem. Pro neodběrové uzly je A_{10} matice incidence uchováající topologii *úsek-uzel se známým tlakem* definovaná podobně jako (9) s rozměry $NU_S * NU_O$. A_{21} je transponovaná matice A_{12} . Matice A_{11} závisí na jednotlivých vztazích tlaku a průtoku u

jednotlivých prvků modelu. Dále v rovnici (9) jsou vektory Q a H neznámé, h_0 je vektor známých tlaků a q vektor známých průtoků (odběrů). Na rozdíl od jiných metod, které ještě navíc definují matici okruhů, celá topologie sítě je u této metody definována v matici A_{12} . Derivací (9) podle času lze získat [44][45][46]:

$$\begin{bmatrix} NA_{11} & A_{12} \\ A_{21} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dQ \\ dH \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dE \\ dq \end{bmatrix} \quad (10)$$

kde $E(Q,H)$ je funkce reprezentující tlakově-průtokové nevyrovnanost pro každý úsek, $q(Q,H)$ reprezentuje průtokovou nevyrovnanost pro uzly. Matice N na hlavní diagonále obsahuje průtokové exponenty (viz. (6)). Definovaná soustava rovnic je nelineární a musí být řešena iteračním procesem. Při položení [46]:

$$\begin{aligned} dQ &= Q^k - Q^{k+1} \\ dH &= H^k - H^{k+1} \end{aligned} \quad (11)$$

kde index k označuje iteraci a po úpravě (10) na [46]:

$$\begin{bmatrix} dQ \\ dH \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} NA_{11} & A_{12} \\ A_{21} & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} dE \\ dq \end{bmatrix} \quad (12)$$

(je potřeba poznamenat, že matice A_{11} se počítá pro průtok Q^i) lze úpravami dospět k [46] (matice G viz. [46]):

$$\begin{aligned} Q^{k+1} &= (I - G^{-1}A_{11})Q^k - G^{-1}(A_{12}H^{k+1} + A_{10}H_0) \\ (A_{21}G^{-1}A_{12})H^{k+1} &= -\{A_{21}G^{-1}(A_{11}Q^k + A_{10}H_0) - (A_{21}Q^k - q)\} \end{aligned} \quad (13)$$

Pro účely algoritmizace musí být rovnice (13), respektive část reprezentující výpočet tlaku, převedena na tvar [46][47]:

$$Ax = b \quad (14)$$

kde vektor x je vektor neznámých tlaků a [46][47]:

$$\begin{aligned} A &= A_{21}G^{-1}A_{12} \\ b &= -\{A_{21}G^{-1}(A_{11}Q^i + A_{10}H_0) - (A_{21}Q^i - q)\} \end{aligned} \quad (15)$$

V tomto případě jsou počítány neznámé tlaky H^{k+1} , pomocí kterých je potom počítán vektor neznámých průtoků. Matice A z (15) má tvar [46][47]:

$$\begin{aligned}
 A_{ii} &= \sum_j \left(\frac{\partial h_{ij}}{\partial Q_{ij}} \right)^{-1} \\
 A_{ij} &= - \left(\frac{\partial h_{ij}}{\partial Q_{ij}} \right)^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

které lze získat dle (6) (parciální rovnice jsou převedeny na diferenciály). V rovnici (15) vektor b je vektor pravých stran (po úpravě(15)), pro který platí [46][47]:

$$b_i = \left(\sum_j Q_{ij} - q_i \right) + \sum_j y_{ij} + \sum_l \left(\frac{\partial h_{il}}{\partial Q_{il}} \right)^{-1} H_0
 \tag{17}$$

kde poslední sčítanec představuje spojení uzlu i k uzlu l , kde je neměnný tlak. Dále y_{ij} je tzv. opravný průtokový faktor, který vychází z h_{ij} pro všechny úseky modelu. (6) a (7) je dále upraveno a derivováno podle průtoku [46][47]:

$$\left(\frac{\partial h_{ij}}{\partial Q_{ij}} \right)^{-1} = \frac{1}{nK_{ij} |Q_{ij}|^{n-1} + 2m|Q_{ij}|}
 \tag{18}$$

pro potrubí a [46][47]:

$$\left(\frac{\partial h_{ij}}{\partial Q_{ij}} \right)^{-1} = \frac{1}{n\omega^2 K_c (Q_{ij} / \omega)^{n-1}}
 \tag{19}$$

pro model čerpadla. A nakonec opravné průtokové koeficienty pro potrubí a čerpadlo jsou [46][47]:

$$\begin{aligned}
 y_{ij} &= \left(\frac{\partial h_{ij}}{\partial Q_{ij}} \right)^{-1} \left(K_{ij} |Q_{ij}|^n + m|Q_{ij}|^2 \right) \text{sgn}(Q_{ij}) \\
 y_{ij} &= - \left(\frac{\partial h_{ij}}{\partial Q_{ij}} \right)^{-1} \omega^2 \left(h_{\max} - K_c (Q_{ij} / \omega)^n \right)
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

Existují i jiné postupy a odvození s podobným výsledkem. Matice A z (16) je v tomto případě řídká matice, proto jsou používány metody k jejímu přeuspořádání, a dále je využívána Choleského faktorizace.

Obecný zápis algoritmus celého výpočtu

Popis celého algoritmu je například v [45]. Ve zkratce lze algoritmus popsat takto:

Tab. 1. Obecný algoritmus výpočtu

N1: [Initialize of objects in model] N2: [Initialize of static heads and node consumptions] N3: [Building and calculation of A and b] N4: [Calculate of x] While(x not satisfy condition) Calculate x N5: [Calculate of x] End While N6: [End]
--

Algoritmus popsáný v Tab. 1 je součástí algoritmu, jehož úkolem je realizovat celou simulaci za použití EPS. Tento algoritmus se opakuje po předem určený čas s předem určeným časovým krokem. V rámci řešení hydraulické analýzy je možné, že se objeví takové stavy, pro které by soustava rovnice neměla řešení. Pro tyto případy je nutné v každém kroku iterace kontrolovat stavy všech objektů apod. Tato skutečnost si vyžaduje poměrně velké režijní náklady z hlediska doby výpočtu, protože mezi každým krokem musí být kontrolován např. stav hladiny v nádrži, stav ventilů apod.

Hlavní limity gradientní metody

Z definice například plyne, že v modelu soustavy musí být definován alespoň jeden uzel s pevně určeným tlakem. Například model sítě, kdy čerpadlo čerpá do potrubní sítě, ve které není připojena ani jedna nádrž apod. není pro tuto metodu řešitelný. Dále není možné touto metodou studovat přechodové jevy, které doprovázejí např. vypnutí a zapnutí čerpadla, rychlé zavření nebo otevření ventilu apod. Další omezení jsou definovány v [46]. Hlavními jsou

- Q-H charakteristika čerpadla musí být monotónně klesající funkce.
- Funkce, která popisuje tlakové ztráty podél potrubí musí být monotónně vzrůstající.

Obecně je ale algoritmus gradientní metody považován za stabilní a poměrně rychle konvergující.

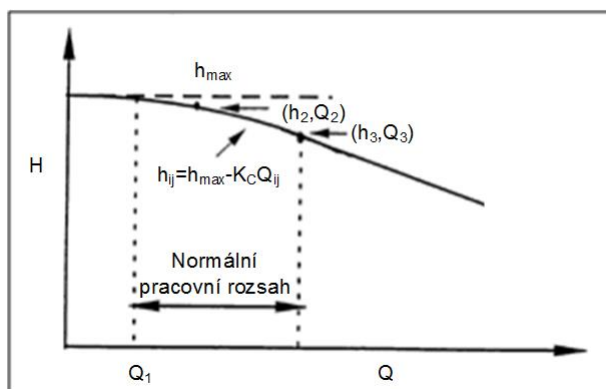
Gradientní metoda je základem většiny komerčně používaných softwarových řešení, která jsou dostupná na trhu. Ve vědecké oblasti je používána hlavně pro návrh tlakových potrubních sítí, jejich optimalizaci, návrhu chodu čerpadel a tak dále. Je základem rozšířených komerčních i nekomerčních aplikací jakou jsou MIKE NET, EPANET apod.

5.3 Modely prvků sítě³

Pro vytvoření matematického modelu hydraulické potrubní sítě je nutné mít matematické modely všech prvků, které síť tvoří. Matematické modely jednotlivých prvků sítě musí být přizpůsobeny s ohledem na použitou metodu řešení celé sítě (v tomto případě gradientní metodu), což znamená, že musí být definovány ve smyslu (6).

Čerpadlo (úsek)

Čerpadlo jako celek je matematicky složité popsat, proto se obvykle přistupuje k nějaké formě zjednodušení. Míra simplifikace je samozřejmě závislá na tom, pro jaký typ metody se model čerpadla tvoří apod. Model čerpadla použitelný pro gradientní metodu musí respektovat (6), respektive (7). Z tohoto důvodu se obvykle volí reprezentace čerpadla pomocí jeho Q-H charakteristiky. Ta bývá určena experimentálně nebo získána od výrobce. Uvažováno je čerpadlo pracující v čerpadlovém režimu. Q-H charakteristika (Obr. 10) je závislost, která může být proložena polynomicou vyššího řádu.



Obr. 10 Q-H charakteristika čerpadla [30] nebo [48]

Výpočet parametrů n , Q_{ij} a K_C , které jsou nutné pro vyjádření dle (7), zveřejnil ve své práci Wood [25]. Jak je zobrazena na Obr. 10 je

$$h_{ij} = h_{\max} - K_C Q_{ij}^n \quad (21)$$

($\omega = 1$) pro

$$n = \frac{\log \left[\frac{(h_1 - h_3)}{(h_1 - h_2)} \right]}{\log \left(\frac{Q_3}{Q_2} \right)} \quad (22)$$

$$K_C = (h_1 - h_2) Q_2^n$$

pro pracovní bod mezi (h_2, Q_2) a (h_3, Q_3) . Jak ve své práci Wood popisuje, je tato reprezentace dostatečná pro hodnoty z intervalu h_{\max} až h_3 . Ve zbylé části je charakteristika skoro přímkou,

³ Podrobnější popis používaných prvků lze nalézt v [45], [46], [47], [48], [50]

a proto se také přímkou nahrazuje. Nicméně tato skutečnost bývá programátory opomíjena a uvedený postup je použit pro celou Q-H charakteristiku. Pro jiné otáčky čerpadla lze vyjít z afinních vztahů

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{n}{n_0}; \quad \frac{Y}{Y_0} = \left(\frac{n}{n_0}\right)^2; \quad \frac{H}{H_0} = \left(\frac{n}{n_0}\right)^2 \quad (23)$$

které lze použít jen v rozmezí otáček

$$0,5 \leq \frac{n}{n_0} \leq 2 \quad (24)$$

kde n_0 jsou nominální otáčky. Tento přístup je rozšířený a málokdy se tedy v implementaci přistupuje ke změně ω v (19).

Potrubí (úsek)

Potrubí je v matematickém modelu objekt, ve kterém dochází k tlakové ztrátě v důsledku tření přenášeného média o stěnu potrubí apod. a nedochází k jeho ztrátě nebo odběru. Mezi nejpoužívanější přístupy k výpočtu tlakové ztráty při průtoku média potrubím patrně patří rovnice Hazen-Williams a Darcy-Weisbach. Pokud jsou uvažovány větvené a okružové sítě, je patrně nejpoužívanější rovnice Darcy-Weisbach. V modelu tlakové potrubní sítě je nutné definovat tlakovou pro všechny druhy proudění, nejenom pro turbulentní. Pro Darcy-Weisbach platí [47]

$$K_{ij} = f_D \frac{L V^2}{d 2g} \quad (25)$$

$n = 2$

kde d je hydraulický průměr potrubí, V je průměrná rychlost přenášeného média, L je délka a g je tíhové zrychlení. f_D (Tab. 2) závisí na Reynoldsově čísle Re .

Tab. 2. Vyjádření f_D

Interval Re	Výjádření f_D
$Re \geq 4000$	Pro výpočet Darcy-Weisbach koeficientu tření je použita Colebrookova rovnice $\frac{1}{\sqrt{f_D}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3,7d} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f_D}} \right)$ (ε je drsnost (závisí na materiálu))
$2000 \geq Re$	$f_D = \frac{64}{Re}$
$4000 > Re \geq 2000$	Pro tento interval je použita kubická interpolační metoda (za použití Moodyho diagramu) [47]

Nádrž (uzel)

Nádrž je z hlediska jejího popisu objekt schopný uchovávat přenášené médium, může být do něj médium přidáváno nebo z něj odebíráno, což zapříčiní změnu hladiny v nádrži. Tlak v uzlu definující nádrž je závislý na výšce hladiny v nádrži. V každé iteraci musí být výška hladiny upravena podle vtoku nebo výtoku uchovávaného média

$$V(t + \Delta t) = V(t) + Q(t)\Delta t \quad (26)$$

Výstupní tlak je tedy funkcí výšky hladiny v nádrži (a hustoty média, tíhového zrychlení, tlakem na hladině nádrže). Změna výšky hladiny je odvislá od přítoku/odtoku z/do nádrže (q), plochy volné hladiny (A). Za časový úsek Δt je

$$\Delta y = \frac{q}{A} \Delta t \quad (27)$$

Předpokládá se, že nádrž je válcového tvaru s konstantním průměrem. Pro jiné tvary je nutné definovat výšku hladiny v nádrži v závislosti na uchovávaném objemu pomocí křivky.

Rezervoár (uzel)⁴

Rezervoár je souhrnný název pro modelovou reprezentaci takových reálných objektů, které slouží jako „nevyčerpatelný“ zdroj přenášeného média. Do této kategorie řadíme jezera, řeky, zdroje spodní vody, vrty apod. V modelu sítě je definován zdroj přenášeného média, jehož výstupní tlak je neměnný bez ohledu na to, jaké průtoky a tlaky jsou v síti nebo jaký průtok na výstupu z tohoto zdroje je realizován. Za použití tohoto prvku jsou v modelech reprezentovány i přípojně body k dalším potrubním sítím, které ale nejsou součástí modelu, nebo o nich nemáme podrobnější informace.

Ostatní prvky

V potrubní síti se mohou vyskytovat i další prvky, jako zúžení, rozšíření, ventil apod. Přístup k modelování těchto prvků je dvojí. Prvním způsobem je vytvoření samostatného úseku, druhý způsob je připojení tohoto prvku k potrubí. Druhý způsob se zdá z hlediska implementace jednodušší a je také více používán. Rovnice (6) je upravena na:

$$h_{ij} = H_i - H_j = K_{ij}Q_{ij}^n + mQ_{ij}^2 \quad (28)$$

První člen představuje ztrátu tlaku v potrubí, druhý člen potom ztrátu tlaku v přidaném prvku. V rovnici (28) je m ztrátový koeficient tohoto nově přidaného prvku, z druhého členu se pomocí průtoku vypočítá rychlost proudění (v) a druhý člen v (28) je nahrazen [47], [50]:

$$\frac{Kv^2}{2g} \quad (29)$$

kde K je pro různé prvky soustavy vyčíslen v Tab. 3, g je tíhové zrychlení.

⁴ Reservoir (rezervoár) je v anglické literatuře mnohdy zaměňován s pojmem nádrž.

Tab. 3. Příklad parametru K u jednotlivých objektů sítě [48][50]

Objekt	Parametr K
Regulační ventil – plně otevřený	0,2
Regulační ventil – 3/4 otevření	1
Regulační ventil – 1/2 otevření	5,6
Regulační ventil – 1/4 otevření	24
Potrubní koleno – malá rádius	0,9
Potrubní koleno – středně velký rádius	0,8
Potrubní koleno – velký rádius	0,6

Ostatní prvky (úsekové)

Složitější chování ventilů je možné popsat univerzálním úsekovým prvkem, pro který je nutné definovat jeho chování pomocí křivky (podobně jako u čerpadla).

6 Návrh a realizace softwarového řešení

V rámci řešení dizertační práce bylo nutností vyvinout celé softwarové řešení a jeho implementaci na danou problematiku. Pro zajištění co největší kontroly nad numerickou simulací za účelem hydraulické analýzy tlakové potrubní sítě jsem realizoval celé softwarové řešení nesoucí název ADAM. Hlavní výhodou je možnost plné kontroly nad výpočtem a tokem programu, možnost modifikovat a doplňovat potřebné části kódu apod.

Implementace byla realizována v podobě výbavově rozlišené softwarové rodiny ADAM. Celý software byl navržen jako modulární aplikace pro hydraulickou analýzu potrubních sítí, jejich kalibraci, verifikaci a návrhu procesních pravidel pro říditelné prvky sítě. Software je vytvořen ve dvou základních verzích, které jsou od sebe odlišeny svou funkcí. Doporučená HW konfigurace je:

- procesor 2GHz a vyšší,
- 4Gb paměti a víc,
- 2Gb volného místa na disku,
- grafickou kartu podporující DirectX 9.0,
- pro optimální běh programu je vhodné mít SSD disk.

Z hlediska softwarové vybavení je vyžadován operační systém Microsoft Windows XP SP3 a vyšší a .NET Framework 4.0 a vyšší.

Softwarová rodina ADAM

Softwarová rodina ADAM je dle své funkčnosti rozdělena na tři základní verze:

- **ADAM NV (Network Viewer)** – tato verze dovoluje importovat modely trubních sítí v nejpoužívanějších formátech (*.INP, *.NET). Dále je v této verzi možné trubní sítě tvořit a upravovat. Model lze uložit v běžných formátech (*.INP, *.NET), dále potom ve formátu *.ADM (formát softwarové rodiny ADAM, lze ho použít k uložení/načtení všech serializačních vlastností objektů), který je tvořen jako XML soubor. Dále je zde možné síť kalibrovat a verifikovat. Obsahuje možnost importovat data z běžných formátů (*.DAT, *.XLS(X), *.CSV, *.TXT). Data lze také exportovat do formátů programu MATLAB, Wolfram Mathematica s/bez průvodce atd. Funkčnost lze rozšířit pomocí rozšiřujících modulů.
- **ADAM NS (Network Solver)** – funkčně nejobsažnější verze (obsahuje všechny moduly) softwarové rodiny ADAM. Obsahuje všechny funkce verze NV. Modely jednotlivých prvků je možné nahradit „vnějšími“ modely (propojením s jiným softwarem). Pro tento účel jsou definovány rozhraní (interface) pro jednotlivé prvky trubní sítě, stejně tak pro samotný řešič atd.

6.1 Software Adam NV

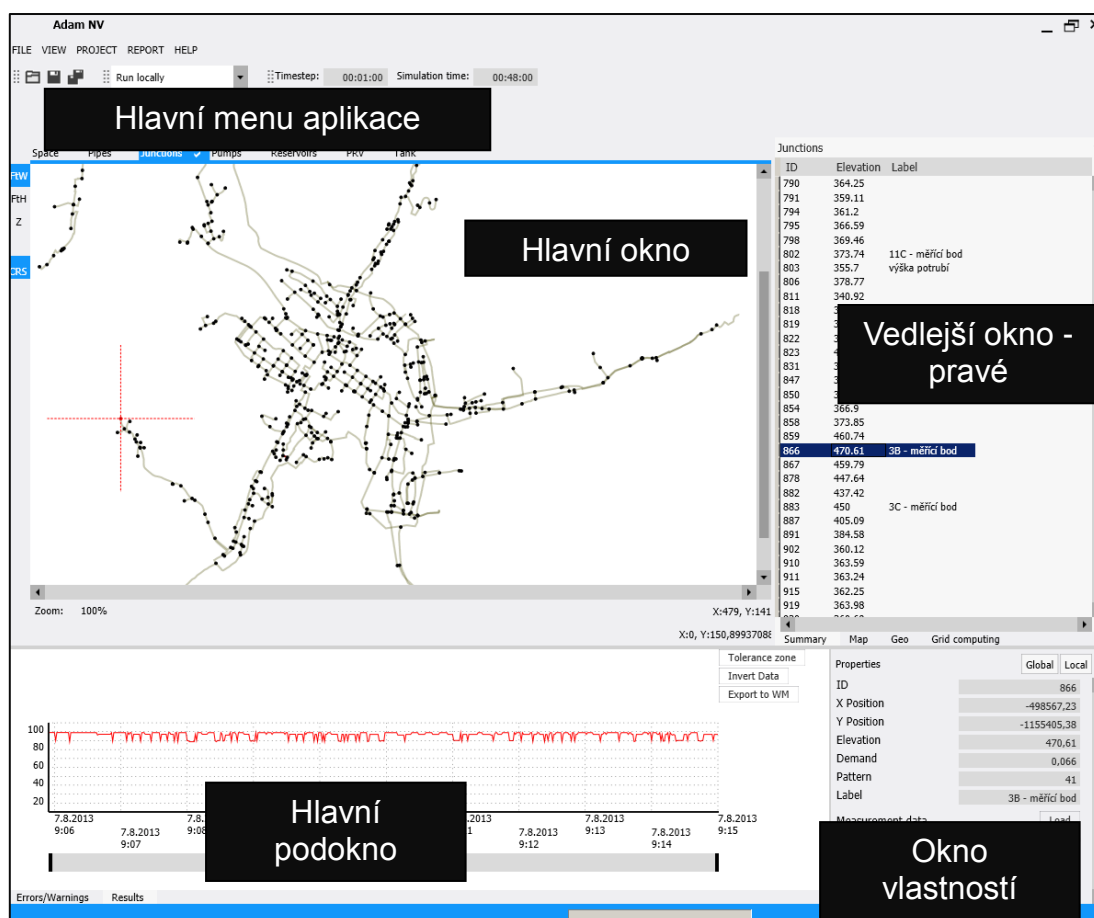
ADAM NV, který je prezentován v této práci, je svou výbavou základní aplikací softwarové rodiny ADAM. Aplikace byla vyvíjena za pomoci metodického frameworku AUP (Agile Unified Process). Celá aplikace byla testována uživateli a získané poznatky autor práce zpětně do softwaru zapracoval. V softwaru je možné jednotlivé modely sítě načítat, numericky řešit a výsledné data porovnávat s měřenými daty, kalibrovat, verifikovat apod. Grafická úprava aplikace byla tvořena hlavně pro účely přehlednosti a použitelnosti aplikace v reálném použití.

Primární funkčnost aplikace ADAM NV (Obr. 11) je zaměřena na načítání a počítačové simulování načteného modelu. Je zde možné měnit parametry objektů modelu sítě. Tyto modely pro pozdější použití ukládat apod. Dále jsou zpřístupněny funkce:

- prohledávání objektů modelu sítě,
- systém hledání konfliktů v modelu sítě,
- systém kontroly simulačního výpočtu,
- systém kontroly validace vložených dat,

Rozšiřující moduly jsou potom:

- kalibrace modelu sítě,
- verifikace modelu sítě apod.



Obr. 11 Software Adam NV (aplha verze)

6.1.1 Grafické rozdělení a funkce programu ADAM NV

Okno aplikace ADAM NV je rozdělena do několika částí.

Hlavní okno

Slouží jako hlavní ovládací okno aplikace. Zde je zobrazována mapa modelu hydraulické sítě. Dovoluje volit možností zobrazení u všech zobrazovaných objektů, volit způsob zobrazení mapy, lze zde používat levé i pravé tlačítko myši, klávesové zkratky apod.

Hlavní podokno

Primárně je určena k zobrazování chybových a varovných upozornění aplikace. Sekundární funkce je grafické zobrazování simulačních nebo měřených dat pomocí grafu. Odtud je možné zobrazovaná data exportovat například do aplikace Wolfram Mathematica.

Vedlejší okno –pravé

První záložka tabulace zobrazuje ve formě editovatelného seznamu všechny součásti sítě dle jejich typu. Uživatel může jednotlivé prvky modelu sítě třídit, prohledávat apod. Druhá záložka tabulace – Map – slouží k ovládání zobrazení podkladové mapy, její intenzity apod. Umožňuje volit datový zdroj map. Třetí záložka – Geo – sdružuje sumarizační informace o rozlehlosti, délce, elevaci jednotlivých prvků apod.

Okno vlastností

Okno vlastností je adaptabilní okno s účelem editovat a zobrazovat jednotlivé parametry všech použitelných prvků soustavy. Hlavním oknem je primárně část globálních vlastností sítě, kde jsou k editování zobrazeny nastavení modelu sítě.

6.1.2 Základní grafické funkce

Software ADAM NV obsahuje některé grafické funkce pro usnadnění práce s mapou sítě. Následuje výčet hlavních grafických funkcí. Podrobněji jsou vlastnosti a funkčnost softwarové rodiny ADAM popsány v příslušných příručkách.

Grafické funkce

Aplikace ADAM je vybavena standardní funkčností – je schopna zobrazovat dle volby jednotlivé typy objektů. Je vybaven funkcí *Focus* pro výběr jednotlivých objektů, funkcí prohledávání objektů a třídění objektů podle jejich parametrů, přičemž všem společná je vlastnost ID, funkce listování, funkce zobrazení vlastností. Mezi další patří:

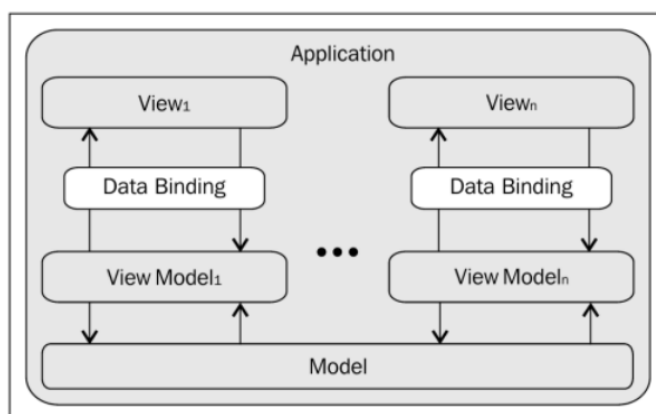
- **Funkce Cross:** při tvorbě modelu je nutné dbát na orientaci průtoku a tlaku v síti. Funkce *Cross* umožňuje uživateli rozeznat orientaci jednotlivých prvků definovaných v modelu sítě. Dále je funkce vhodná hledání jednotlivých prvků v síti.
- **Grafické funkce pro zobrazení sítě:** v modelu rozlehlých sítí je mnohdy obtížné se orientovat. Proto byly implementovány tři základní funkce pro jejich zobrazení. Funkce *FtW* (Fit to Width) upraví zobrazení sítě na výšku okna. Funkce *FtH* (Fit to Height) upraví zobrazení sítě na šířku okna. Funkce *Z* (Zoom) je klasická funkce přiblížení mapy.
- **Podkladová mapa:** jednotlivé objekty sítě jsou prostorově orientovány pomocí tří

souřadnic – elevace, zeměpisná šířka a délka. Aplikace ADAM dovoluje zobrazit podkladové mapy pro orientaci mapy v reálném prostoru. Implementována je také možnost stahování podkladových map z Google Maps, Mapy.cz a systému CENIA.

6.1.3 Použité technické prostředky

Software Adam byl v obou verzích vytvořen pomocí WPF technologie firmy Microsoft, přičemž realizační model respektuje pravidla agregačního návrhového vzoru MVVC (Obr. 12). Zvolený přístup zajišťuje výhodné oddělení prezentační vrstvy softwaru od datového modelu a zbylé logiky. Prezentační vrstva může být tvořena i webových rozhraním. Software je spustitelný na strojích s architekturou x86 a x86-64 (x64). Podmínkou je operační systém Windows XP SP3 nebo vyšší a platforma .NET 4.0. Logika softwaru je realizována pomocí programovacího jazyku C#. Software je primárně určen pro platformu x64, nicméně existuje i pro verze x86.

Výhodou použitého agregačního vzoru M-V-V-C je možnost změny části VIEW, a tím například docílení změny z konzolové aplikace na aplikaci cloudovou. Přístup, kdy je výpočetní jádro softwaru v tzv. cloudu, je dnes v softwarovém odvětví velmi dynamicky rozšiřující se možností. Možnost zaručené „třídevítkové“ dostupnosti aplikací v cloudu dává výraznou výhodu softwarovým vývojářům, což by pro softwarovou rodinu ADAM znamenalo přesunutí výpočetního jádra aplikace na server, a tím výrazně snížit možnosti nežádoucích zásahů ze strany uživatele.



Obr. 12 MVVC model použitý v tvorbě aplikace ADAM [51]

6.2 Struktura softwaru

Celý software je naprogramován objektově v jazyce C#. Návrh softwarového řešení odráží požadavky na obecnost a jednoduchou modifikovatelnost. Celý software je rozdělen do několika propojených modulů.

Mezi hlavní součásti softwaru jsou započítány moduly (Obr. 13):

- reprezentující model trubní sítě (Adam.Core.Network.dll)
- pro načítání modelů potrubní sítě ze souboru INP (Adam.Files.InpFile.dll)
- pro načítání modelů potrubní sítě ze souboru aplikace ADAM (Adam.Files.Load.dll)
- pro načítání měřených dat (Adam.Files.DataLoad.dll)
- reprezentující pracovní okno (Adam.Workspace.dll)
- pro zobrazení potrubní sítě (Adam.Panels.NetworkCanvas.dll)
- pro systémové styly (Adam.SystemStyles.dll)
- pro zobrazení a práci vlastnostmi objektů (Adam.Panels.dll)

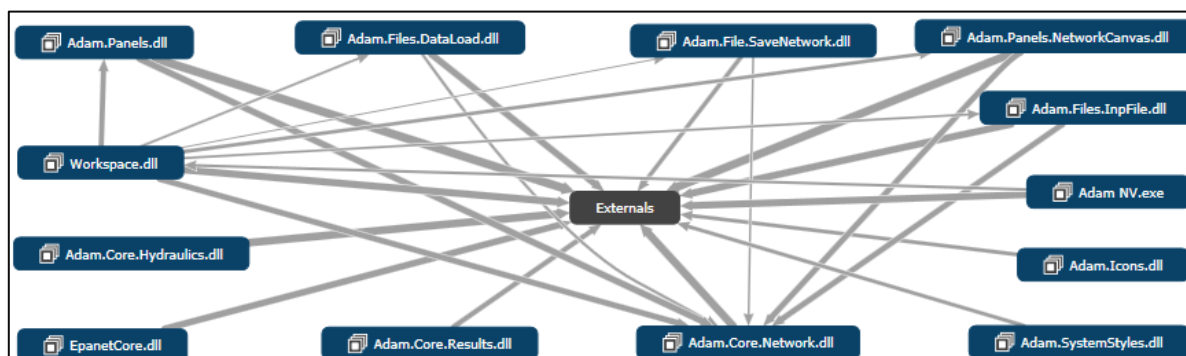
Pro vyšší verze potom třeba:

- pro načítání a modifikaci map (Adam.Maps.dll)
- pro genetický algoritmus (Adam.Core.GA.dll) atd.

6.3 Výpočtové jádro softwaru ADAM

Jádro softwarové rodiny ADAM vychází z výpočtového jádra, které vytvořil v roce 1997 Lewis A. Rossman v rámci institucionálního vývoje provedeného v United States Enviromental Protection Agency (EPA). Aplikace EPANET, která toto výpočtové jádro obsahuje, se stala v oblasti hydraulické analýzy potrubních sítí standardem.

Výpočtové jádro je naprogramováno v jazyce C. Protože softwarová rodina ADAM je programována ve vysokoúrovňovém jazyce C#, nebylo efektivní výpočtové jádro do softwaru bez výrazných úprav adaptovat, a to ani jako dynamicky linkovanou knihovnu. Z důvodu vyšší kontroly simulace jsem vyvinul hydraulický řešič, do kterého byly nejzákladnější funkce jádra implementovány. Beze změny byly použity funkce pro iterační řešení rovnice $Ax=B$ a její tvorbu. Nyní je tedy hydraulický řešič adaptován na prostředí .NET., kde lze výhodně využít jeho vlastností (zvláště GC a LINQ).



Obr. 13 Základní struktura softwaru Adam NV (aplha verze)

7 Tvorba modelu v softwaru ADAM

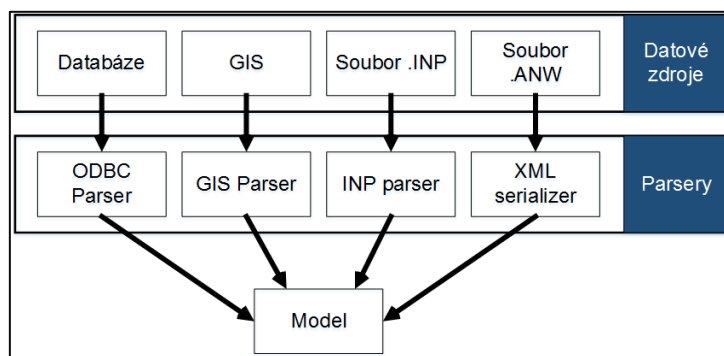
Tvorba modelu tlakové hydraulické sítě je vždy postupný a zdlouhavý proces. Proto jsem vytvořil metodiku tvorby těchto modelů pro aplikaci ADAM.

Je rozdělena do tří kroků:

- **Vytvoření modelu:** spočívá ve tvorbě modelu v softwaru ADAM, přičemž výstupem by měl být model, jehož topologie odpovídá topologii sítě. Výsledky hydraulické simulace pravděpodobně nebudou odpovídat reálným hodnotám sítě. Výstupem je model sítě, který je z matematického pohledu řešitelný.
- **Kalibrace a verifikace:** jedná se (mnohdy) o iterativní proces, který je podrobněji popsán níže. Výstupem je model sítě, který je s požadovanou přesností schopen predikovat parametry soustavy. Následující dva podkroky se opakují, dokud není model věrohodný:
 - **Kalibrace:** cílem kalibrace je úprava modelu za účelem zvýšení jeho věrohodnosti.
 - **Verifikace:** za pomoci verifikace je ověřována schopnost predikce vytvořeného modelu.
- **Nasazení modelu:** poslední krok je nasazení modelu k použití. Někdy je tento krok doplněn statistickou analýzou. Nejpoužívanější je pravděpodobně citlivostní analýza.

Vytvoření modelu

Při tvorbě modelu je nutné mít potřebné informace (rozměry potrubí, typy čerpadel apod.). Existují v zásadě dva způsoby tvorby modelu potrubní sítě. Prvním, stále se rozšiřujícím, je tvorba modelu načítáním definičních dat z datového zdroje. Datovým zdrojem v tomto případě rozumíme jak již vytvořené soubory obsahující potřebné informace, tak i možnost importovat (nebo exportovat) data z databáze. V důsledku nejednotných struktur databází je tento způsob tvorby modelu patrně nejjednodušší. Je ale zároveň nejméně kontrolovatelným, což v důsledku může vést k zanesení nežádoucích chyb. Příkladem je načítání dat z databáze GIS. Při načítání modelu ze souboru se chyby objevují zřídka, což je důsledek různými softwary pevně definovanými strukturami zápisu/načítání (např. INP soubor apod.). Poslední zmíněný přístup je použití příslušné dokumentace modelované sítě. Pro tyto účely jsem vyvinul softwarové řešení překladačů (parserů) vstupní dat pro aplikaci ADAM (Obr. 14).



Obr. 14 Možnosti importu dat do softwaru ADAM NS

Každý hydraulický objekt modelu má své parametry, přičemž některé z nich musí být vyplněny, aby bylo možné spustit simulaci modelu. Na rozdíl od obvyklé počítačové definice modelu sítě jsem navrhl její objektovou reprezentaci s rozšířenými parametry. Základní parametry jsou definovány s ohledem na možnou migraci dat mezi softwary, tedy jejich struktura odpovídá všeobecně používané struktuře modelu. Některé parametry hydraulických objektů modelu jsou společné pro všechny hydraulické prvky:

- **Identifikátor:** je celé kladné číslo pro jednoznačnou identifikaci v rámci modelu. Zadání je v softwaru ADAM automatizováno, bez možnosti změny ze strany uživatele.
- **Lokalizace:** pozice pro uzly je definována pomocí tří souřadnic. Základním souřadným systémem v softwaru ADAM je WGS84 (World Geodetic System of 1984), takže souřadnice jsou zadávány ve formě zeměpisné šířky, délky a elevace.

Další vlastnosti jednotlivých typů hydraulických objektů jsou:

- **Odběrový uzel:** je nutné definovat průtokový odběr média z uzlu. Ten může být definován pomocí konstanty nebo odběrové křivky. V případě definice pomocí odběrové křivky je nutné, aby byla definována buď pro 24h nebo 168h (týden). Popřípadě je možné použít sérii odběrových křivek.
- **Rezervoár:** je nutné definovat elevaci (ta je již definována v rámci společných vlastností).
- **Nádrž:** je nutné definovat elevaci dna nádrže. Dále ještě počáteční, minimální a maximální výšku hladiny.
- **Potrubí:** je nutné definovat počáteční a koncový uzel potrubí, vnitřní průměr, drsnost a délku. Drsnost musí být zadávána s ohledem na použitou metodu výpočtu tlakových ztrát podél potrubí (Darcy-Weisbach).
- **Čerpadla:** je nutné definovat počáteční a koncový uzel čerpadla. Dále je nutné definovat Q-H charakteristiku čerpadla. V literatuře se lze obvykle setkat se třemi způsoby zadání křivky – jednobodové, tříbodové a nakonec vícebodové. V případě jednobodové definice je zadáván jen pracovní bod čerpadla. Nejvyšší dopravní výška je definována jako 133% dopravní výšky pracovního bodu čerpadla a maximální průtok při nulové dopravní výšce jako dvojnásobek průtoku v zadaném pracovním bodě čerpadla. Při zadání tří bodů je nutné vybrat bod, při kterém je průtok nulový nebo malý, pak pracovní bod a konečně bod při nulovém průtoku. Při obou těchto způsobech zadání jsou body proloženy křivkou druhého řádu. Při vícebodovém zadání je poté mezi každou dvojicí bodů definována přímka. Při tomto způsobu zadání je nutné, aby jich bylo zadáno dostatečně mnoho (více než čtyři). Doporučován je poslední způsob zadání.
- **Ventil, šoupátko apod. jako součást potrubí:** je nutné definovat počáteční a koncový uzel, ve kterém objekt situován. Dále K koeficient.
- **Úsekový objekt:** je nutné definovat počáteční a koncový uzel a definující křivku.

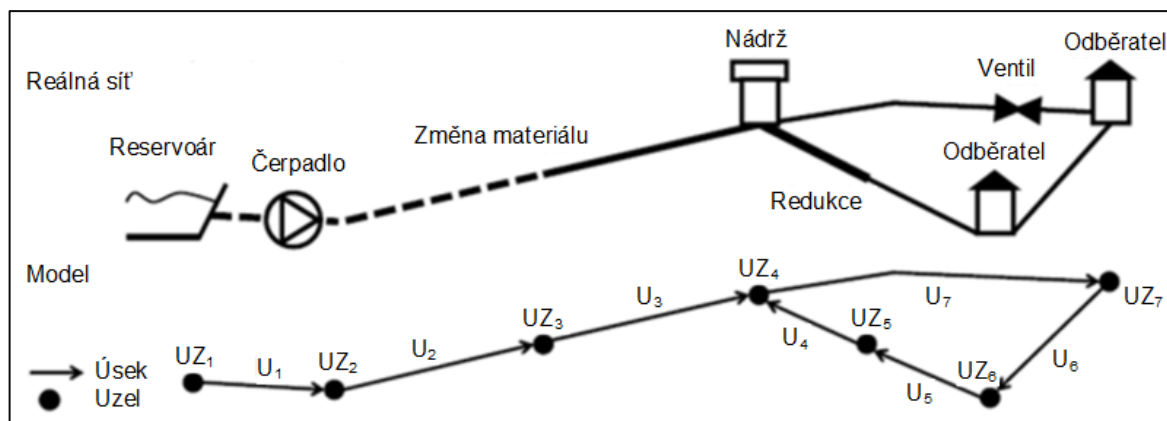
Rozšířená definice modelu sítě zahrnuje možnosti adaptabilní modifikaci počátečních a okrajových podmínek v rámci použití EPS.

Skeletonizace – 2. část

Jak bylo řečeno výše, je model rozdělen na úseky a uzly (Obr. 15). Je-li modelována větší nebo velká hydraulická síť, je z praktického hlediska nemožné např. měřením definovat odběr každého spotřebitele. Nadmíru by tím i narůstala výpočtová náročnost modelu. Například při zadání 10^3 uzlů v modelu by matice koeficientů měla 10^6 prvků. Je tedy vhodné do modelu zaznamenávat velké odběry, jako jsou průmyslové objekty apod. Malé odběratele je nutné „sdužit“ a nahradit jedním velkým. Toho lze docílit např. pomocí metod:

- **Redukovaných délek.** Tato metoda je používána, pokud nejsou k dispozici podrobné informace o jednotlivých malých odběrech. Na základě předpokládaného odběru podél jednoho potrubí (např. dle příslušných norem, zkušeností, obvykle míře zástavby apod.) je definován redukční součinitel C a redukovaná délka je potom vypočítána jako $L_r = CL$, kde L je skutečná délka potrubí. Po zopakování pro všechny potrubí modelu je stanovena celková redukovaná délka modelované sítě jako součet všech redukovaných délek potrubí. Pro každé potrubí potom stanovíme specifickou potřebu přenášeného média $q_r = Q/S_r$. Výsledný odběr úseku z celkové potřeby je $Q = qL$.
- **Metoda dvou součinitelů.** Tato metoda je používána v případě, máme-li dostatečně detailní podklady o odběrech z jednotlivých uzlů. Každému úseku je přiřazena dvojice součinitelů C_1 (počet odběratelů) a C_2 (specifická spotřeba na jednoho odběratele). Stanovíme koeficient $P = C_1C_2$ pro každé potrubí sítě, dále pak $S = \sum P$. Pro každé potrubí sítě je potom stanoven potřeba odběru jako $Q = qP$.

Další používanou metodou je metoda redukovaných ploch apod.



Obr. 15 Ukázka skeletonizace sítě (převazto a upraveno z [52])

Tvorba modelu v softwaru ADAM z hlediska uživatele

Je nutné poznamenat, že potrubí je v modelu vždy vedeno jako přímé, model je tedy definován přímo mezi dva uzly. Je-li nutné zadat potrubí nepřímé, je to v softwaru ADAM možné. Aplikace automaticky rozdělí potrubí na přímé úseky a definuje příslušné uzly – například kolena apod. Ztrátový koeficient je v např. v tomto případě definován dle úhlu, které potrubí svírají. Proto je nutné, aby uživatel zadával co nejpřesnější koordináty a délky potrubí. Z hlediska programátora zde vzniká konflikt. Je možné zadat souřadnice, kdy vzdálenost počátečního a koncového uzlu není v souladu se zadanou délkou potrubí.

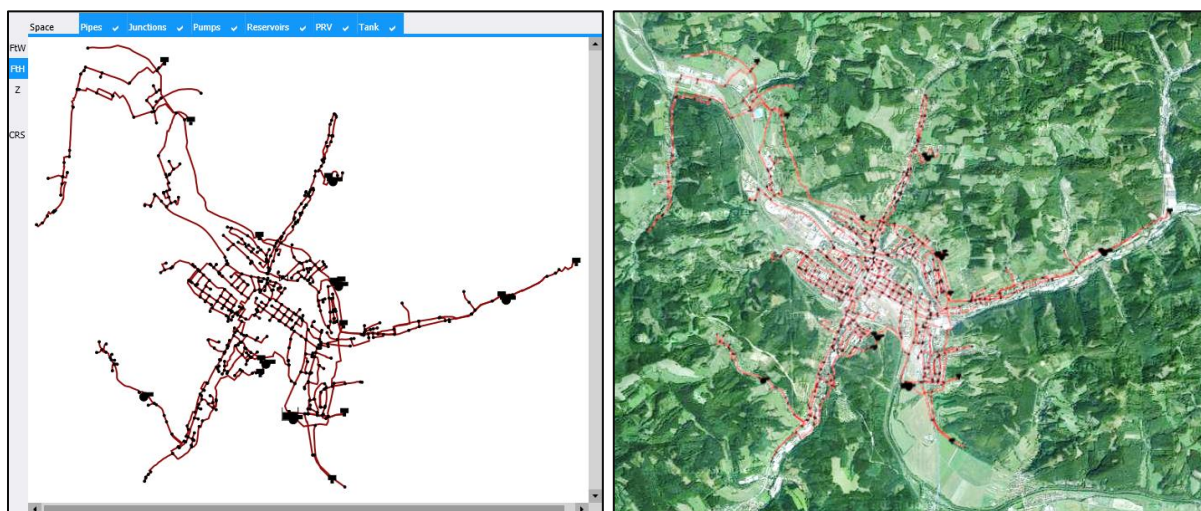
Z tohoto důvodu bylo implementováno pravidlo, které říká, že uživatel musí zadat koordináty, aplikace dopočítá vzdálenost a v rámci tolerance ji dovolí uživateli opravit. Pro příjemnější uživatelskou práci se aplikací ADAM bylo podobných pravidel aplikováno více, nicméně software je z hlediska uživatelského rozhraní stále ve vývoji.

8 Model potrubní sítě Vsetín v aplikaci ADAM

Vytvořený software a jeho výpočtové jádro bylo testováno na dvou soustavách pro dodávku pitné vody různých obcí – Vsetín a Kateřinice. Modely byly vytvořeny ve spolupráci s Ústavem vodního hospodářství FAST VUT v Brně. Součástí tvorby modelu je proces kalibrace a verifikace, k čemuž je v případě těchto sítí nutná dostatečná zásoba přenášeného média. V případě modelu Kateřinice byla v důsledku vlny veder v létě roku 2013 kalibrace a verifikace právě nedostatkem vody znemožněna (viz. příloha B).

8.1 Model vodovodního řadu města Vsetín

Potrubní síť slouží k dodávání pitné vody pro město Vsetín a přilehlé obce. Celkové rozmístění jednotlivých prvků potrubní sítě je ukázáno na Obr. 16, 17 a 18. Celková sumarizace potrubní sítě je zachycena v Tab. 4. Celá potrubní síť byla vypracována dle zadávací dokumentace, prošla procesem kalibrace a verifikace [53].



Obr. 16 Zobrazení modelu potrubní sítě města Vsetín s podkladovou mapou a bez podkladové mapy (ortofotomapa) v aplikaci ADAM NS

Jedná se poměrně rozsáhlý model tlakové potrubní sítě, která obsahuje nádrže, reservoár, odběrná místa, čerpadla apod. Celá síť se rozkládá na území přibližně 18 km² a zásobuje vodou přibližně 27 tisíc obyvatel, včetně průmyslových objektů apod. Použité potrubí v síti má různé vnitřní průměry, různé drsnosti apod.

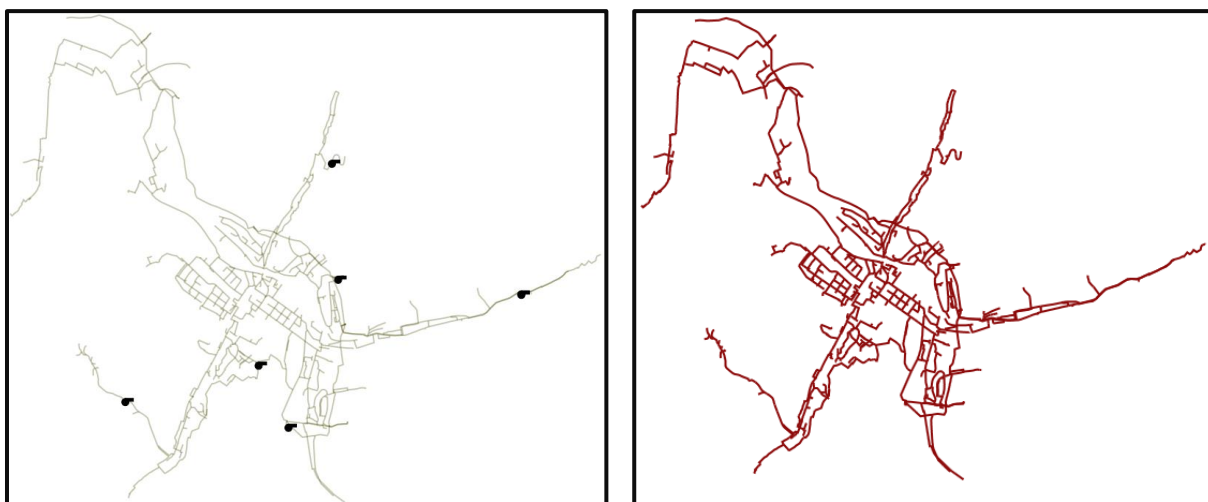
Tab. 4. Základní sumarizace potrubní sítě pro dopravu vody města Vsetína

Celková délka potrubí:	89 486,65 m
Počet potrubí:	723
Počet čerpadel:	7
Počet reservoárů:	1
Počet vodojemů (nádrží):	13



Obr. 17 Zobrazení potrubní sítě města Vsetín – rozmístění vodojemů (nádrží), rozmístění reservoárů

Na (Obr. 17) je zobrazeno rozmístění vodojemů (nádrží) a pozice reservoáru v modelu města Vsetína.



Obr. 18 Zobrazení potrubní sítě města Vsetín - rozmístění čerpadel, rozmístění potrubí

Na (Obr. 18) je zobrazeno rozmístění čerpadel a potrubí v modelu potrubní sítě města Vsetína. Některé parametry prvků modelu sítě je nutné mít pro úspěšné řešení vyplněny. Pokud nějaká data modelu chybí, aplikace ADAM nedovolí spuštění výpočtu a dále pomocí upozornění v hlavním podokně uživatele o této skutečnosti informuje.

9 Kalibrace a verifikace modelu

Věrohodnost modelu je závislá na tom, jsme-li na základě získaných simulačních výsledků schopni s předem definovanou přesností predikovat chování reálné soustavy. Vytvořený model sítě, i když je numericky řešitelný a založený na výrobní dokumentaci prvků tvořící síť, obvykle nelze pro věrohodnou predikci použít z důvodu nepřesnosti vstupních parametrů (nepřesná dokumentace, časové opotřebení apod.). Z tohoto důvodu je nutné parametry modelu modifikovat, čímž dochází ke zpřesňování modelu. V rámci spolupráce s Ústavem vodního hospodářství Fakulty stavební jsem formuloval následující metodiku [54], která je založena mimo jiné na tzv. fire-flow tests atd., přičemž zpřesnění modelu je rozděleno do dvou fází – kalibrace a verifikace.

9.1 Kalibrace modelu

Podstatou celého kalibračního procesu je vhodné nastavení parametrů simulačního modelu tak, aby simulačně získané hodnoty tlaku byly ve shodě s těmi měřenými. Za předpokladu stejných počátečních a okrajových podmínek pro model a reálnou soustavu definujeme tlakový rozdíl jako:

$$\Delta p = p_M - p_C \quad (30)$$

kde p_M je měřený hydrodynamický tlak a p_C je hydrodynamický tlak získaný pomocí simulačního modelu ve stejném bodě při referenčním průtoku. Model je považován za validní, pokud platí $\Delta p \leq 0,01 \text{ MPa}$. Požadavek větší přesnosti většinou není nutný i s ohledem na použitý měřicí aparát. Kalibrace modelu je rozdělena do tří navazujících částí – měření na potrubní síti, celoplošná kalibrace a detailní kalibrace.

9.1.1 Příprava a měření kalibračních dat⁵

Data pro kalibraci je nutné měřit na potrubní síti a ty poté statisticky zpracovat. V rámci spolupráce s Ústavem vodního hospodářství Fakulty stavební byla formulována následující metodika [54].

Postup měření a zpracování dat pro plošnou kalibraci

Pro celoplošnou kalibraci je využito dlouhodobě měřených dat o průtocích a tlacích (tlak nemusí být měřen dlouhodobě). Data reprezentující průtoky jsou měřena na odtoku z vodojemu do vodovodní sítě (osazením průtokoměrem se záznamem dat). Data jsou měřena v průběhu několika měsíců s krátkým časovým krokem – 2 až 5 min. Měření by ideálně mělo probíhat po dobu 3 měsíců, optimálně 4 až 5 měsíců (v případě jiných typů sítě ekvivalentně dlouho). Měření by mělo být realizováno i v době vyšších průtoků za účelem zachycení nejvyšších odběrů. Získaná data po zpracování představují tzv. charakteristické odběrové křivky (characteristic demand pattern) pro daný bod odběru. Tato data jsou potom vložena do odpovídající části uzlu modelu, kde tvoří pro každý simulační krok počáteční podmínku – $Q(t)$ v časovém kroku t . Z měřených dat jsou definovány tyto hodnoty:

⁵ Uvedené časové intervaly a metody platí pro síť z kapitoly 9

- Q_{min} – hodnota minimálního průtoku v době nejmenšího odběru,
- Q_p – průměrný průtok,
- Q_h – maximální průtok hodinový průtok (u jiného typu sítě je použit ekvivalentní časový rozsah),
- Q_{max} – maximální dosažený průtok, který byl dosažen po dobu 5 minut (u jiného typu sítě je použit ekvivalentní časový rozsah).

Ověření přesnosti hydraulického výpočtu je dosaženo porovnáním měřených a simulačně vypočítaných hydraulických tlaků při Q_{min} , Q_p , Q_h a Q_{max} .

Zároveň s měřením průtoků se za pomoci měřidla provede i plošné měření hydraulického tlaku. Místa měření „hustota“ měřicí sítě je závislá na rozlehlosti a topologii sítě, profilu terénu a také podle místa odběrů přenášeného média ze sítě. Měření hydraulického tlaku probíhá alespoň 72 hodin, lépe ovšem po dobu 10ti dnů s časovým krokem 15 sekund. V případě rychlé změny tlaku (tlakového rázu) je měření prováděno s frekvencí 10 Hz. Po statistickém vyhodnocení jsou definovány tyto hodnoty:

- p_{min} – minimální tlak, který se vyskytl po dobu 5 minut (u jiného typu sítě je použit ekvivalentní časový rozsah),
- p_{max} – maximální tlak, který se vyskytl po dobu 5 minut (u jiného typu sítě je použit ekvivalentní časový rozsah).

Pro potřeby kalibraci je nejdůležitější hodnota p_{max} , jenž byla naměřena při dosažení maximální hladiny ve vodojemech a minimálním průtoku Q_{min} .

Postup měření pro detailní kalibraci

Měření je realizováno pomocí měřicí aparatury (viz. Obr. 19 a Obr. 20) nebo za použití SCADA systému. Ze sítě je vypouštěn přesně definovaný průtok přenášeného média. V místě odběru a po celé trase průtoku vody je zároveň měřen hydrodynamický tlak. Pro detailní kalibraci je nutné měřené hodnoty průtoku a tlaku reprezentovat jako související n-tice, přičemž rozmezí odebíraných průtoků je voleno plynule s krokem $0,5 \text{ dm}^3\text{s}^{-1}$ v rozmezí od počáteční hodnoty (průtok v potrubí před započítáním odběru) až po maximální dosaženou hodnotu [54].

Je nutné poznamenat, že data a způsob jejich měření je použit pro kalibraci sítě, a tím tedy je ale také omezena platnost modelu.

9.1.2 Vlastní proces kalibrace

Kalibrační proces je rozdělen na dvě části. První část, celoplošná kalibrace (*grid calibration*), je zaměřena na odstranění hrubých chyb v definici sítě. Druhá část, detailní kalibrace (*detailed calibration*) je zaměřena na odstranění menších chyb v síti [54].

Grid calibration

Je prováděna pro korekci modelu sítě k odstranění hrubých chyb v její definici. Na základě měřených dat je v určených bodech sítě sledován tlak a průtok v časovém intervalu od několika dnů až po měsíce. Hlavní sledované parametry modelu jsou:

- tlakové pásma,
- průtok – směr a přibližná hodnota,

- výška hladiny v nádržích,
- charakteristiky čerpadel apod.,

příčemž jsou v této části kalibrace převážně odstraňovány tyto chyby:

- chybějící potrubí,
- omylem uzavřené potrubí,
- špatně definovaná topologie,
- špatně definovaná výška nádrže

Výstupem musí být model sítě, jehož výsledky dobře odpovídají skutečně naměřeným hodnotám.

Detailed calibration

Proces detailní kalibrace je postupný proces zaměřený na přesnější kalibraci v rámci menších částí hydraulické sítě, který navazuje na úspěšně ukončený proces celoplošné kalibrace. Typicky jde o spojitě sekce potrubní částí jejichž délka se pohybuje od přibližně 500 do 1000 metrů délky. V této části kalibrace je model hydraulické sítě upravován tak, aby bylo vyhověno podmínce (30). Úprava modelu je docílena modifikací parametrů, viz. dále. Obvykle se detailní kalibrace provádí hlavně pro úseky, které mají na celou síť největší vliv.

9.2 Verifikace modelu

Verifikací modelu rozumíme schopnost simulačního modelu s předem danou přesností predikovat chování reálné soustavy. Požadovaná přesnost je závislá např. na typu modelované sítě, její velikosti, přenášeném médiu, přesnosti použitých měřících prostředků, použité výpočtové metodě apod. Úspěšná verifikace modelu je podmínkou pro použití modelu v reálném provozu a je nutné brát v úvahu, že opravňuje použití modelu jen pro např. určitý interval tlaků a průtoků apod. Verifikovaný model soustavy není vhodné používat např. mimo pásma tlaků, které jsou svým rozsahem mimo rozsah kalibračních dat.

Verifikace modelu spočívá v porovnání vypočtených hodnot tlaku a průtoků s měřeními. Nutnou podmínkou je, že porovnávaná měřená data nesmí být zároveň data použitými ke kalibraci modelu. Verifikační sada dat by měla vystihovat různé provozní stavy sítě. Měření verifikační sady dat je prováděno podobně jako v případě kalibrace. Pokud je verifikace neúspěšná, je nutné zopakovat proces kalibrace.

9.3 Implementace do aplikace ADAM

Na základě vypracované metodiky jsem vytvořil softwarový kalibrační modul pro software ADAM. Z programátorského hlediska si oba procesy, kalibrace i verifikace, modelu sítě vyžadují stejnou softwarovou strukturu. Výjimkou je, že kalibrace si obvykle vyžaduje změny v modelu. Hlavním výstupem kalibračního modelu je upozornění uživatele na rozdíly v modelu, které by mohly být důvodem ke změně modelu. Změna v modelu neprobíhá automaticky, musí být udána uživatelem.

9.3.1 Kalibrace v softwaru ADAM NS

Kalibrace modelu vychází ze skutečnosti, že počáteční podmínky modelu tvoří měřená data získaná za tímto účelem, k čemuž byla uzpůsobena struktura aplikace a vyvinut kalibrační

modul. Dále je nutné porovnávat vypočtené a měřené tlaky v uzlech modelu sítě a na základě (30) tento model upravit. Tato modifikace modelu na základě měřených dat potrubní sítě spočívá ve vhodné změně jednotlivých parametrů prvků modelu trubní sítě. Některé z těchto parametrů mohou být změřeny, jindy je možno vycházet z báze znalostí uživatele.

Nejčastěji modifikované parametry jednotlivých prvků modelu jsou:

- **Potrubí** – vnitřní průměr a drsnost (můžou být změněny např. usazeninami). Tyto změny jsou patrně nejčastěji zastoupeny.
- **Čerpadlo** – změněné parametry vzhledem k časovému opotřebení (změna je reprezentována změnou charakteristik čerpadla)
- **Ventil** – změněné parametry vzhledem k časovému opotřebení (změna je reprezentována změnou charakteristik ventilu) apod.

Z hlediska uživatele byl proces kalibrace v aplikaci ADAM pro model rozlehlejší tlakové hydraulické sítě charakteristický někdy až nepříjemně dlouhou sérií kliknutí na předkládané nabídky. Některé používané zásahy se v procesu kalibrace opakují a mnohdy nemění, proto vznikla snaha tyto znalosti a dovednosti uživatele zformulovat do algoritmizovaných pravidel, tzv. kalibračních pravidel, které jsou součástí *ADAM Calibration Toolbox*. Použití algoritmizovaných pravidel má velkou výhodu v možnosti opakování tolikrát, kolikrát je to nutné.

Kalibrační pravidla pro celoplošnou kalibraci

Proces kalibrace matematického modelu sítě je možné vyjádřit pomocí předem definovaných pravidel, jejichž aplikace vede ke změně parametrů modelu. Z tohoto důvodu jsem navrhl a realizoval kalibrační toolbox (*ADAM Calibration Toolbox*), kde byla některá pravidla algoritmizována a je tedy možné je použít na kterýkoliv model potrubní sítě. Výstupem provedené algoritmu – kalibračního pravidla – je návrh uživateli k přijmutí opatření.

9.3.2 Příklad implementace kalibračních pravidel pro proces celoplošné kalibrace

Příkladem implementace je pravidlo pro hledání tlakových rozdílů u měřených a vypočtených hodnot v části sítě za nádrží (Tab. 5). Výsledek (v kódu jako R:) je závislý na definici sítě, dle toho je také modifikován. Tato modifikace, po odsouhlasení uživatelem, je automatická.

Tab. 5. Algoritmus pro hledání tlakových rozdílů

```

N1: [Initialize and run simulation]
N2: [Initialize calibration data]
N3: [Application of rule]
    bool Flag = true;
    For (EveryPipeAfterTank(Tank J))
        If ( $\Delta p < 0$ )
            Flag = false;
        End If
    End For
N4: [Generation of result]
    If (Flag)
        IncreaseMediumLevelInTank(Tank J)  $\rightarrow$  R
    End If
N5: [End]

```

Pro záporné tlakové rozdíly platí úprava dle Tab 6.

Tab. 6. Algoritmus pro hledání tlakových rozdílů

```

N3: [Application of rule]
    bool Flag = true;
    For (EveryPipeAfterTank(Tank J))
        If ( $\Delta p > 0$ )
            Flag = false;
        End If
    End For

```

Dále lze definovat například pravidlo pro hledání uzavřených potrubí.

Tab. 7. Algoritmus pro hledání uzavřených potrubí

```

N1: [Initialize and run simulation]
N2: [Initialize calibration data]
N3: [Application of rule]
    bool Flag = true;
    For (EveryPipe)
        If ( $\Delta p \approx 0$ )
            LowPressureInPipe(J)  $\rightarrow$  R
        End If
    End For
N4: [End]

```

A podobně. Výstupy pravidel (v algoritmu popsány jako R) jsou nabídnuty uživateli k vytvoření zásahu. Například výstupem z algoritmu pro hledání uzavřených potrubí (Tab. 7.) je nabídka ke změně stavu potrubí z *otevřené* na *uzavřenou*. Zásah samotný vždy musí být povolen uživatelem (což je základní podmínka užívaná ve všech aplikacích rodiny ADAM, vyjma výpočtového serveru ADAM server).

9.3.3 Implementace kalibračních pravidel pro proces detailní kalibrace

Detailní kalibrace se při aplikaci na praktické tvoření modelu z velké většiny omezují na změny drsnosti a vnitřního průměru potrubí. Tyto parametry je možné měnit manuálně, což je při detailní kalibraci rozlehlejší síť velmi zdlouhavý proces. Je tedy všeobecnou snahou i tento proces algoritmizovat, konkrétněji úlohu detailní kalibrace převést na optimalizační problém.

Přístupy lze rozdělit do dvou skupin. První skupina využívá evolučních algoritmů [56], druhá nikoliv. Z první skupiny lze jmenovat metodu GRG [57]. Tato metoda je založena na výpočtu gradientu účelové funkce s respektem ke všem kalibračním parametrům. Podobné metody představili například Lansey [58], Reddy a kol. [59], Datta a Sridharan [60] nebo Pudar a Ligget [61]. S využitím EPS potom např. Omrsbee [62].

Druhá skupina nějakým způsobem využívá heuristický postup. Nejpoužívanější je patrně genetický algoritmus. S využitím EPS je postup zpracován například v práci pánů Goldberga [63], Savice [64], Kapelan [65] a Vítkovský [66]. Mezi výhody tohoto přístupu lze uvést [67], [68]:

- implementace je poměrně jednoduchá,
- může být aplikován na poměrně rozlehlé potrubní síť,
- použití je ověřené na praktických problémech,
- je poměrně jednoduché k již existujícím přidat další omezující podmínky
- a je vhodné k paralelizaci.

Detailní kalibrace pomocí genetického algoritmu

Genetický algoritmus je obecně známý a používaný heuristický postup vycházející z principů evoluční biologie, spadá tedy do oblasti evolučních algoritmů. Principem genetického algoritmu je postupná tvorba generací tzv. jedinců, kde každý jeden představuje jedno řešení daného problému. Každý jedinec z populace potom podléhá evolučním principům – mutaci, křížení a reprodukci. Implementace genetického algoritmu pro hledání optimálních parametrů vnitřního průměru potrubí a drsnosti každého potrubí v síti tak, aby byla splněna (30) lze zapsat obecně tímto způsobem:

Tab. 8. GA pro hledání parametrů jednoho potrubí

```

N1: [Initialize and run simulation]
N2: [Initialize calibration data]
N3: [GA - Initialization of populations]
N4: [GA - Evaluate fitness of each individual]
N5: [GA - While] (eq. (30) is not satisfied)
    Find N of best evaluated individuals and apply on them (delete rest)
    Cross
    Mutation
    Reproduction
    Run simulation and evaluate individuals // For every population
N6: [GA - End While]
N7: [End]
```

Tab. 8. ukazuje implementaci genetického algoritmu do aplikace ADAM. Je realizován jako DLL knihovna, který je součástí kalibračního toolboxu. Způsoby jeho použití jsou obecně dva:

- **Vytvoření jedné populace, kde jedinec nese 2n parametrů pro síť, která obsahuje n potrubí** – tento přístup je použitelný pro menší síť. Výhodou je rychlost výpočtu *fitness* pro každého jedince. Nevýhodou je praktická nepoužitelnost pro rozsáhlé síť.
- **Vytvoření n nezávislých populací, kde jedinec nese 2 parametry pro síť, která obsahuje n potrubí v síti** – hlavní výhodou je použitelnost i pro poměrně rozsáhlé síť. Nevýhodou je čas potřebný pro výpočet *fitness* každého jedince. Druhá nevýhoda je paměťová náročnost na uchování n populací.

Pro použití v aplikaci ADAM byl zvolen druhý způsob implementace. *Fitness* každého jedince může být definován jako rozdíl tlaků, nebo rozdíl jejich kvadrátů, který je minimalizován. Tedy každý jedinec představuje dvojici parametrů – drsnost a vnitřní průměr potrubí. Genetický algoritmus hledá vhodnou kombinaci parametrů drsnosti a vnitřního průměru pro každé potrubí modelu tak, aby tlaková ztráta podél potrubí odpovídala rozdílu tlaků dle (30). Před optimalizací je nutné vymezit interval, ve kterém se mohou hledané parametry pohybovat. Je nutné zdůraznit, že algoritmus je spouštěn pro každé potrubí, tedy přístupem co potrubí, to jedna populace.⁶

⁶ Výše je napsáno, že je „Vytvoření n nezávislých populací, kde jedinec nese 2 parametry pro síť, která obsahuje n potrubí v síti“. Tento přístup může být vylepšen například určením stáří potrubí. Dále u některých typů sítí je pravděpodobné, že na sebe navazující potrubí budou mít podobnou míru inkrustace a podobnou drsnost. Tyto možnosti sice neporušují tvrzení, že jsou *populace nezávislé*, ale uživatelem dané omezení ve tvaru příslušných intervalů mohou dané skutečnosti zohlednit. Otázkou zůstává, zda je vhodné hledané parametry potrubí omezovat jen vzhledem k danému intervalu nebo i vzhledem k parametrům přechozího potrubí.

9.4 Použitý měřicí aparát

Proces kalibrace modelu potrubní sítě je závislý na in-situ měření hydraulických veličin – průtoku a hydraulického tlaku. V případě tlakových hydraulických sítí pro dodávku pitné vody je typickým měřicím místem např. požární hydrant (Obr. 19)

Pro účely kalibrace byly použity dva měřicí přístroje (viz. Tab. 9):

- Odběrové měřidlo tlaku a průtoku (Obr. 19) – je vybaveno ponorným lopatkovým průtokoměrem a tlakoměrem. Definovaná měřicí soustava je za účelem záznamu měřených hodnot vybavena datalogerem – Sensus Metering Systems CLD-2U. Největší potrubí, kde lze měřidlo použít je s průměrem 1250mm.
- Bezodběrové měřidlo tlaku a průtoku (Obr. 20) – je tvořeno měřidlem tlaku firmy BD SENSORS – DMP 331

Oba měřicí přístroje byly kalibrovány v hydraulické laboratoři Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Protože data jsou měřena z několika míst hydraulické sítě zároveň, je velmi důležité, aby měřicí přístroje měly co možná nejpřesněji nastavený interní čas pro účely správné datové synchronizace. Měřidla jsou vybavena dataloggerem pro záznam dat.

Tab. 9. Základní parametry použité měřicí aparatury

Průtokoměr	Přesnost	$\pm 0,1 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$
	Rozsah	Od 0,5 do 15,0 $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$
Tlakoměr	Přesnost	$\pm 0,0025 \text{ MPa}$
	Rozsah	Od 0,0 do 1 MPa



Obr. 19 Měřidlo tlaku a průtoku [69], [70]

Tento typ měřidla je používán pro kalibraci typu fire-flow test, při které je ze sítě vypouštěno poměrně velké množství přenášeného média. V průběhu vypouštění je pomocí dataloggeru zaznamenán tlak a průtok.



Obr. 20 Měřidlo tlaku (BD SENSORS – DMP 331), Datalogger – Sensus Metering Systems – CLD (2U) [69], [70]

V tomto nově navrženém modulu je možné změřená data načíst a spojit s určeným objektem modelu potrubní sítě. Pokud jsou data uložena v souboru, je za předpokladu zachování předem určené datové struktury možné tato data také načíst. Primárně jsou podporovány tyto typy souborů – CSV, TXT a XLS(X) (Obr. 21).

Při použití TXT a CSV typu souborů je nutné zachovat předem definovanou datovou strukturu. Ta je rozdělena do třech sloupců, které musí být v souboru odděleny tabelátorem nebo středníkem:

- první sloupec je datem ve tvaru *dd.mm.yyyy*, *d.m.yyyy* nebo jejich kombinace
- druhý sloupec definuje čas ve tvarech *h:mm*, *hh:mm*, *hh:mm:ss*, *hh:hh:ss:MM* nebo jejich kombinací
- třetí sloupec reprezentuje naměřené hodnoty. Jako desetinný oddělovač je možné použít desetinou čárku a tečku.

Soubory XLS jsou definovány standardně firmou Microsoft (XML soubor).

```
9.3.2013;8:00;1,6949
9.3.2013;9:00;1,8615
9.3.2013;10:00;1,8615
9.3.2013;11:00;1,8615
9.3.2013;12:00;1,8335
9.3.2013;13:00;1,7501
9.3.2013;14:00;1,6393
9.3.2013;15:00;1,6949
```

9.3.2013	4:00	0,7222
9.3.2013	5:00	0,7222
9.3.2013	6:00	0,9168
9.3.2013	7:00	1,3058
9.3.2013	8:00	1,6949
9.3.2013	9:00	1,8615
9.3.2013	10:00	1,8615

8	9.3.2013	6:00	0,9168
9	9.3.2013	7:00	1,3058
10	9.3.2013	8:00	1,6949
11	9.3.2013	9:00	1,8615
12	9.3.2013	10:00	1,8615

Obr. 21 Příklad měřených dat, která lze importovat (vlevo zobrazeny data ze souboru typu CSV, ve středu mezerami oddělená data ze souboru TXT, vpravo data ze souboru XLS, XLSX)

10 Ověření modelu potrubní sítě města Vsetín

Pro návrh procesních pravidel za účelem regulace je nutné vytvořený model potrubní sítě kalibrovat a verifikovat (viz. předchozí kapitola). Model samotný je vytvořen z mnoha prvků, jejichž reprezentace v aplikaci ADAM není přesná. Také odběry v uzlech, které definují podmínky pro řešení modelu, jsou statistickým výsledkem měření na reálných soustavách. Proto jsou definovány odběrové křivky v modelu v zásadě několikerého typu. Typicky se liší odběrová křivka pro továrnu, restauraci, domácnost, kancelář atd. Jistým řešením je nahrazení odběrových křivek měřenými daty z potrubní sítě. Což je ale v praxi jen zřídka možné.

Měření pro porovnání se simulačními hodnotami bylo provedeno na dvou místech tlakové potrubní sítě. První sada měřených dat představuje průtok potrubím 181 (Obr. 22), je to tedy odběr z vodojemu Bečevná. Druhá sada dat představuje průtok v potrubí číslo 260 a odběr z vodojemu Rokytnice. Oba vodojemy zásobují části města, které na mapě (Obr. 22) leží nalevo od nich. Data byla měřena dlouhodobě (3 roky) každé dvě minuty. Výsledky měření za každou hodinu jsou statisticky zpracovávány s cílem nalézt

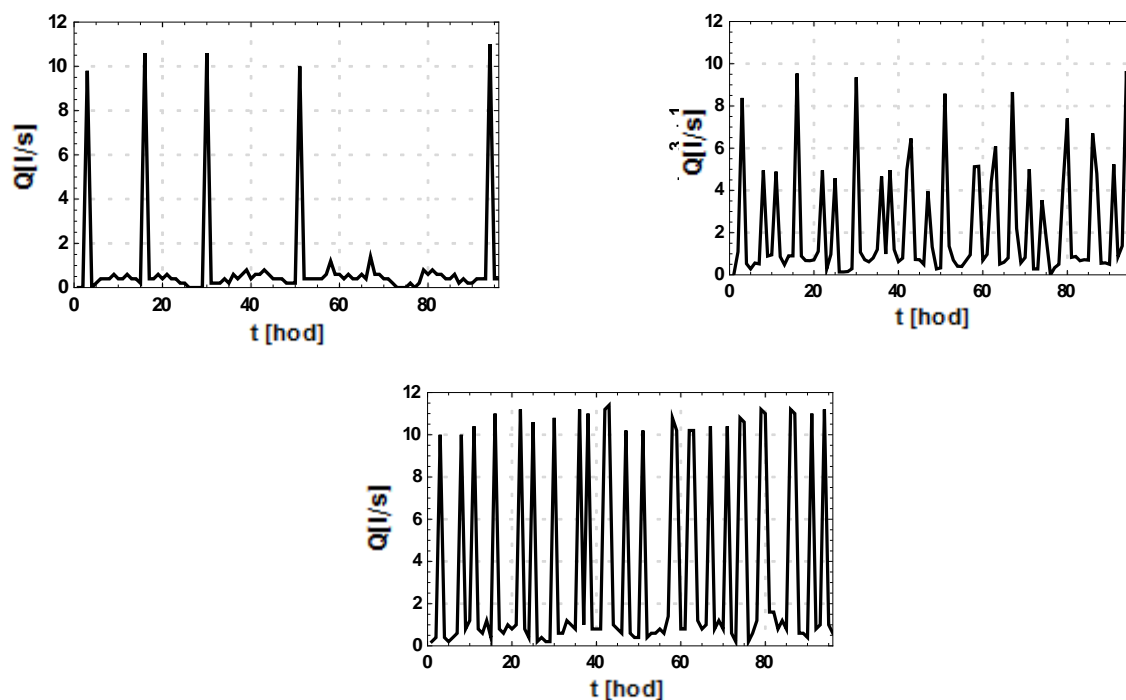
- **minimum** - minimální odběr za danou hodinu,
- **průměr** - všechna měření jsou průměrována,
- **maximum** - maximální odběr.

Měřená data jsou potom zobrazena na Obr. 23 a Obr. 24.



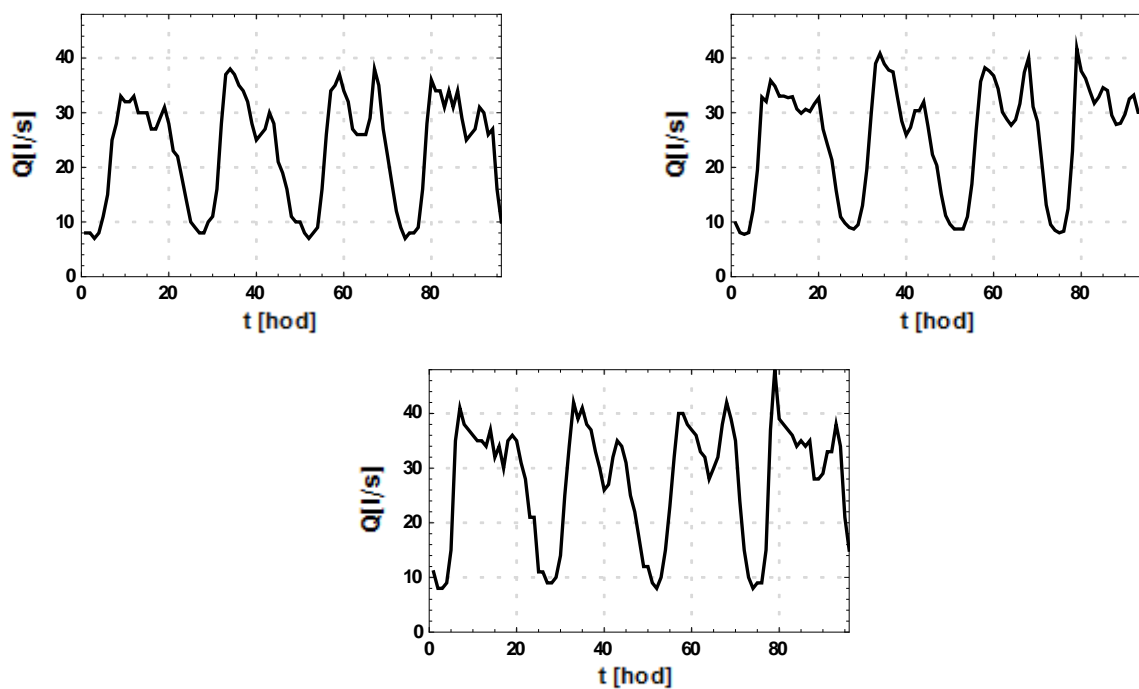
Obr. 22 Mapa potrubní sítě zobrazená v aplikaci ADAM NS

Měřený průtok z VDJ Rokytnice – odtok Lhotka (potrubí 260)



Obr. 23 Měření průtoku (VDJ Rokytnice) – odběr Lhotka (13.3.2009) a) minimální b) průměrná c) maximální

Měřené průtok z vodojemu Bečevná – odtok Vsetín DTP (potrubí 181)



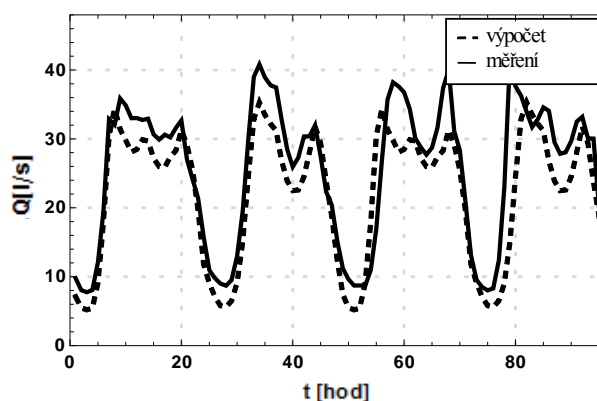
Obr. 24 Měření průtoku (VDJ Bečevná) – odběr Vsetín DTP (13.3.2009) a) minimální b) průměrná c) maximální

10.1 Porovnání vypočtených a simulovaných hodnot

Vytvořený, kalibrovaný a verifikovaný model je nutné porovnat pro nezávislou sadu měřených dat. Výsledky simulace z aplikace ADAM jsou porovnávány v rámci 4denního časového intervalu vůči měřeným hodnotám. Porovnávání je prováděno na odtoku jak z vodojemu Rokytnice, tak z vodojemu Bečevná.

VDJ Bečevná

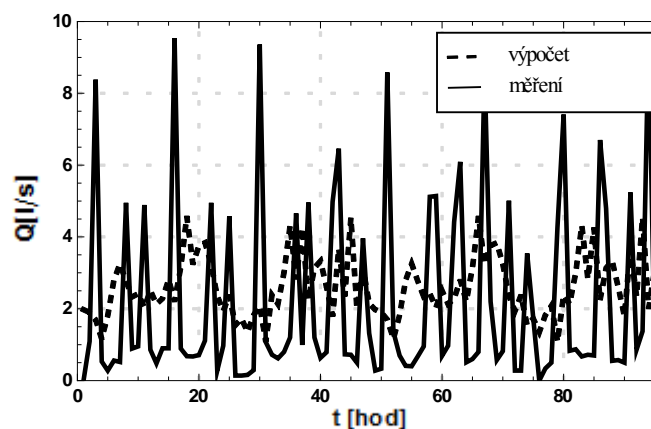
Na Obr. 25 a Obr. 26 jsou zobrazeny jak měřené tak i simulačně získané hodnoty průtoku na odtoku do DTP Vsetín z VDJ Bečevná. Hodnoty zobrazované jako měřené (plná čára) jsou průměrné hodnoty za období 4 dnů.



Obr. 25 Porovnání měřených a vypočtených dat

VDJ Rokytnice – odtok Lhotka

Na Obr. 26 je porovnáván měřený odtok z vodojemu Rokytnice a vypočtené hodnoty pomocí modelu získané softwarem ADAM. Porovnáváné měřené hodnoty jsou průměrné (viz výše), nicméně zde vidíme poměrně vysoké průtokové výkyvy. Průtokové křivky, které jsou definovány pro odběrové uzly zásobených z vodojemu Rokytnice, neobsahují tyto výkyvy z důvodu jejich nepravidelnosti. Dle modelu se z vodojemu Rokytnice odebere o 18% méně přenášeného média, než bylo změřeno.



Obr. 26 Porovnání měřených a vypočtených dat

11 Návrh regulace

Výsledná procesní pravidla mají být navržena pro řešení situace popsané v cílech práce. Jedná se návrh procesních pravidel pro případ poklesu dodávek pitné vody z přehrady Karolinka (Obr. 27). Přehrada Karolinka představuje pro město Vsetín hlavní zdroj pitné vody, zároveň je to zdroj pitné vody pro přilehlou aglomeraci čítající okolo 80 000 lidí. Město Vsetín má ještě druhý zdroj pitné vody, a to prameniště Ohrada (studna s úpravnou vody). Přivaděč pitné vody z přehrady Karolinka, Stanovnice, zásobuje 11 vodojemů uvažované vodovodní sítě s průměrným průtokem přibližně 250 litrů za sekundu. Z důvodu nedávných oprav přehrady vznikla otázka, zdali je možné z prameniště Ohrada zásobovat i část města Vsetína, která je závislá na dodávce vody z vodojemu IBV Ohrada. Je nutné podotknout, že pro zásobování města Vsetína z Prameneště Ohrada nelze použít přivaděč Stanovnice, protože mezi těmito dvěma potrubními částmi neexistuje spojení.

Prameniště Ohrada aktuálně představuje zdroj pitné vody pro části města Vsetína, které jsou zásobeny z vodojemu Bečevná a Rokytnice. Aktuální způsob regulace je odvíjen od výšky hladiny v příslušných vodojemech. Čerpání z Prameneště Ohrada je spouštěno tak, aby hladina ve vodojemu Bečevná neklesla pod hranici jednoho metru. Pokud je to možné, je upřednostňováno čerpání v době levného elektrického tarifu. Obdobně to platí při čerpání z vodojemu Bečevná do vodojemu Rokytnice. Vodojem Bečevná přitom představuje jediný zdroj pitné vody pro vodojem Rokytnice.

V případě omezení dodávky pitné vody ze Stanovnice je odstavena část sítě pro dodávku spotřebitelům a čerpá se přímo do nádrže IBV Ohrada, dokud se nádrž nenaplní. Poté je opět připojena část města Vsetína a k čerpání se v tomto případě nepřistupuje. Bez regulace otáček čerpadla by byl tlak v uzlech, kde jsou připojeni spotřebitelé, větší než dovolených 0,6MPa (a i to je hraniční hodnota, ideálně je tlak 0,35 až 0,45 MPa).

Navržená procesní pravidla mají odpovídat těmto omezením:

- tlak ve sledovaných uzlech číslo 2562, 2566 a 2588 nesmí překračovat hranici 0,6MPa,
- ideálně by se tento tlak měl pohybovat v rozmezí 0,35MPa až 0,45Mpa,
- tlakové změny by měli být co nejmenší,
- hladina v nádrži IBV Ohrada nesmí klesnout pod hranici 1 metru.

Navíc je třeba uvážit další skutečnosti. Nejdůležitějším je fakt, že prameniště Ohrada je zároveň zdrojem pro vodojem Bečevná a Rokytnice. Hlavní omezení zde tedy vzniká v podobě celkové doby čerpání. S ohledem na velikost uvedených vodojemů a spotřebu v rámci zásobovaných částí sítě je povolená doba čerpání do vodojemu IBV Ohrada omezena na přibližně 6 a půl hodin denně (maximálně 8,5 hodiny denně). Mezi další požadavky patří skutečnost, že předpis otáček čerpadla má platit pro dva dny – jeden den pracovní a navazující den volna.

Metoda návrhu

Návrh procesních pravidel je realizován pomocí genetického algoritmu, kdy je hledáno řešení ve formě vektoru obsahujícího pro každý počítaný časový krok číslo, které reprezentuje otáčky čerpadla. Mezi požadavky patří doba simulace, která činí 48 hodin se simulačním krokem 3 minuty. Při tomto nastavení simulace by vektor X měl 960 prvků, což by bylo z hlediska optimalizace prakticky nemožné dosáhnout. Proto byla možnost zásahu omezena na 15ti minutové intervaly. Skutečnost, že je hydraulická analýza uskutečňována pomocí EPS, má za následek, že není možné jednu simulaci rozdělit a hledat vektor X pro simulace s menší simulační dobou. Proto jsem výpočetní jádro upravil tak, aby výpočet nebyl dokončen, pokud alespoň jeden z výsledků neodpovídá zadaným regulačním omezením (velmi obecně Tab. 10).

Tab. 10. Upravený algoritmus výpočtu

```

N1: [Initialize of objects in model]
N2: [Initialize of static heads and node consumptions]
N3: [EPS] While(EndOfSimulation)
    Calculate demands
    Calculate regulation actions
    HA algorithm (Tab 1)
    If (RegulationConditions satisfied) -> Continue
    Else EndOfSimulation -> N4
N4: [EPS] EndWhile
N5: Save calculated data

```

Úprava výpočetního jádra v tomto případě výrazně šetří výpočetní čas pro nalezení procesních pravidel. Simulace s krokem 3 minuty a celkové době řešení 48 hodin trvá přibližně 80 sekund. Uvážíme-li, že čerpadlo má pracovat 6 a půl hodiny denně, přičemž doba čerpání není souvislá, je jeden z prvních regulačních zásahů proveden v prvních krocích simulace (v prvních hodinách modelu). Pokud zásah neodpovídá zadaným omezením, může být v tomto případě úspora například 70 sekund. Výpočet je také ukončen v případě, že se například vyprázdní vodojem apod. Uvedená skutečnost je velkou výhodou vlastní implementace gradientní metody.

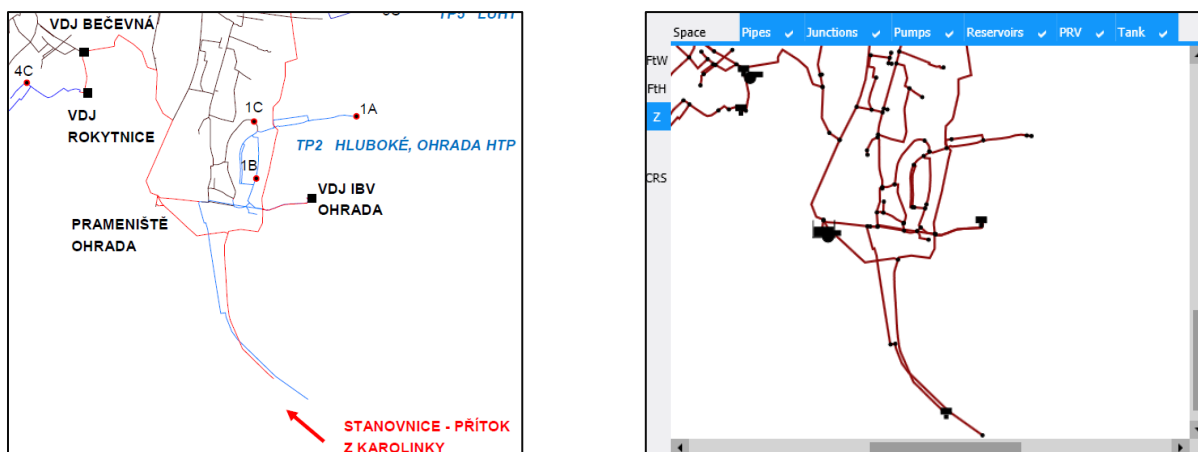
Jak je uvedeno výše, je vektor X hledán pomocí genetického algoritmu. Všechny omezující podmínky se výše uvedeným zásahem převedly na hydraulický řešič, respektive na výpočetní jádro. *Fitness* každého jedince je definován jako suma rozdílů tlaku ve sledovaném uzlu a hodnoty 0,45MPa. Další výrazným urychlením hledání vektor X je skutečnost, že nehledáme nejlepší možné řešení, ale jakékoliv vyhovující.

Procesní pravidla jsou navrhována tak, aby zachovávala hlavní požadavky provozovatelů potrubních sítí pro dodávku pitné vody:

- **spolehlivost** – metoda vychází ze skutečnosti, že spotřebitelé nejsou odpojováni od sítě při procesu plnění vodojemu,
- **cena** – metoda nevyžaduje žádné investiční náklady,
- **jakost** – v tomto případě definována objemem vody ve vodojemu, který by zde byl uchováván více než 2 dny.

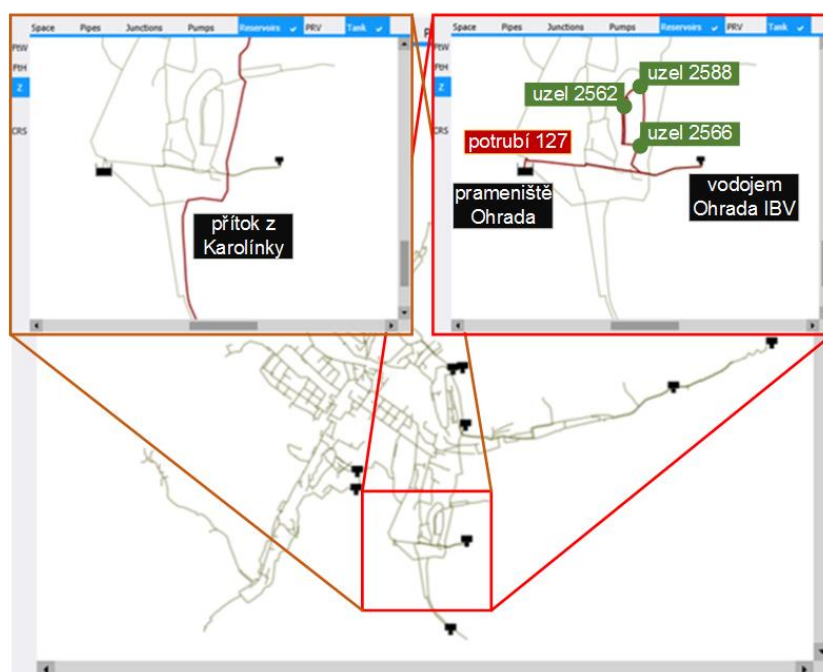
Popis regulované soustavy

Regulovaná soustava je součástí potrubní sítě pro dodávku pitné vody pro město Vsetín, přičemž regulace je navrhována pro situaci, kdy hlavní zdroj pitné vody, přehrada Karolinka, není v plné výši schopen dodávek pitné vody. Topologie sítě je na Obr. 27 a Obr. 28.



Obr. 27 a) Mapa části tlakové potrubní sítě pro dopravu pitné vody města Vsetína [53]; b) Stejná část potrubní sítě zobrazena v aplikaci ADAM NS

Z prameniště ohrada je pitná voda čerpána horizontálními čerpadly firmy Vogel MPA 125 2/3 (příkon 45kW) nebo MPA 125 2/5 (75kW). Každé čerpadlo je zálohováno identickým čerpadlem. Při čerpání do vodojemu Bečevná jsou průtoky 35 respektive 20 litrů za sekundu. Z vodojemu Bečevná se čerpá pomocí čerpadla firmy Grundfos CR 45-3A (11kW, cca. 12 litrů za sekundu). Parametry vodojemů jsou popsány v Tab. 11 až Tab. 13.



Obr. 28 Mapa regulované soustavy v zobrazená v softwaru ADAM NS. Vlevo nahoře je zvýrazněn přítok pitné vody z přehrady Karolinka přivaděčem Stanovnice. Vpravo nahoře je zvýrazněna hlavní část regulované soustavy.

Tab. 11. Parametry vodojemů IBV Ohrada

Elevace dna nádrže:	424,5 m
Průměr:	7,61 m
Maximální výška hladiny ve vodojemu:	8,67 m
Minimální výška hladiny ve vodojemu:	1 m

Tab. 12. Parametry vodojemu Bečevná

Elevace dna nádrže:	398,5 m
Průměr:	27,65 m
Maximální výška hladiny ve vodojemu:	5,62 m
Minimální výška hladiny ve vodojemu:	1 m

Tab. 13. Parametry vodojemu Rokytnice

Elevace dna nádrže:	435,4 m
Průměr:	12,62 m
Maximální výška hladiny ve vodojemu:	3,6 m
Minimální výška hladiny ve vodojemu:	1 m

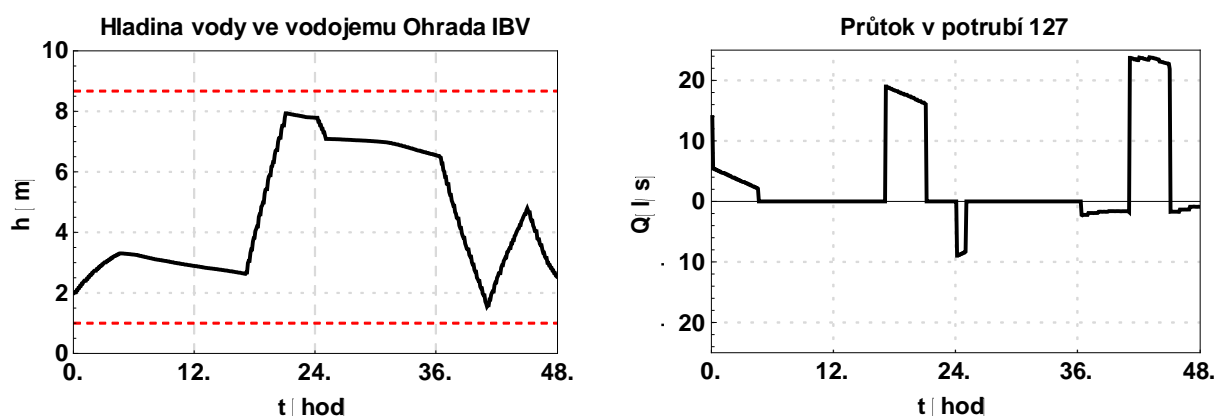
Sledovány jsou tyto význačné body regulované soustavy – uzel 2562, 2566, 2588 (odběrové uzly na sídlištích s elevací postupně 382,06m, 368,11m, 371,24m). V době plnění vodojemu IBV Ohrada je potrubí vedoucí do vodojemu Bečevná zavřeno, stejně jako přilehlá potrubí. Vodojem plní přes potrubí 127 a další navazující potrubí. Uzly 2562, 2566 a 2588 jsou dále připojeny potrubím k části sítě zajišťující dopravu pitné vody v „centru“ města Vsetína.

11.1 Simulační výsledky regulace

Regulace byla provedena za těchto počátečních podmínek:

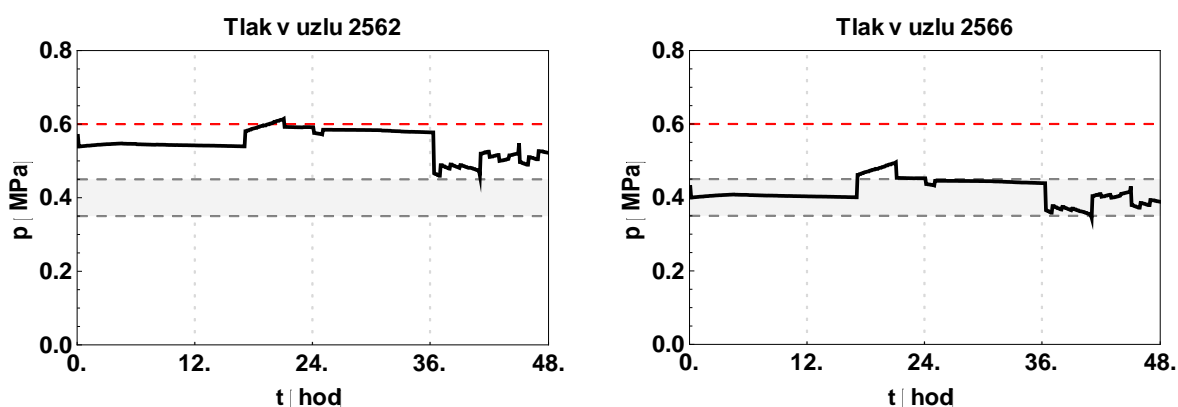
- začátek simulačního experimentu je stanoven na půlnoc pracovního dne před volným dnem,
- doba simulace je stanovena na 48 hodin,
- počáteční hladina v nádrži je metr nad minimem,
- za dodržení výše uvedených podmínek.

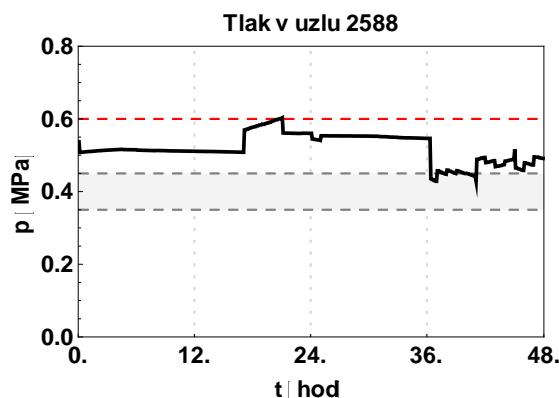
Hledáno je jakékoliv odpovídající řešení pomocí implementovaného genetického algoritmu. Nevýhodou tohoto přístupu je, že ne vždy je nalezeno stejné řešení. Výsledky simulačního experimentu jsou zobrazeny na Obr. 29 a Obr. 30.



Obr. 29 Výsledky simulace: vlevo je zobrazen graf reprezentující výšku hladiny ve vodojemu IBV Ohrada v průběhu simulačního experimentu. Červené čárkované čáry představují minimální a maximální úroveň hladiny ve vodojemu. Vpravo je zobrazen graf reprezentující průtok v potrubí 127, z kterého lze usuzovat na vektor X .

Na Obr. 29 vlevo je zobrazen průběh hladiny v nádrži IBV Ohrada. Počáteční hladina nádrže byla 2m, koncová přibližně 3,5m. Graf vpravo potom představuje průtok potrubím 127.





Obr. 30 Výsledky simulace - tlaky: vlevo nahoře uzel 2562, vpravo 2566 a dole 2588. Červená čárkovaná čára představuje hranici 0,6MPa. Šedá část grafu potom interval tlaků 0,35MPa až 0,45MPa.

Na Obr. 30 jsou zobrazeny tlaky ve sledovaných uzlech. Dle očekávání je největší tlak v uzlu 2562. Tento uzel je z hlediska regulace tedy nejkritičtější.

V textu výše ale nebylo uvedeno, proč právě tyto uzly jsou sledovány. Odpověď leží ve formulaci problému. Z hlediska polohy bodů a topologie sítě právě tyto uzly tvoří kritická místa z hlediska regulace. Nejdůležitější je ovšem uzel 2562, kde je na reálné soustavě skutečně měřeno. Všechny tři uzly jsou zároveň odběrového charakteru.

Simulace byla zkoušena s různými počátečními podmínkami tak, aby byly nalezeny odpovědi na otázky typu:

- jaká je kritická hranice pro úroveň hladiny v nádrži IBV Ohrada jako počáteční podmínky pro takto zadaný simulační experiment? (Odpověď: 1,4m)
- jaká je nejkratší doba čerpání pro takto zadaný experiment? (Odpověď: přibližně 4,5h),
- jaké jsou nevyšší dovolené otáčky čerpadla (MPA 125 2/5)? (Odpověď: přibližně 1,02 nominálních otáček) apod.

Odpovědi tohoto typu nejsou přesné v důsledku použité metody hydraulické analýzy.

12 Ověření navržených procesních pravidel

Protože jsou tato navržená procesní pravidla navržena heuristickým algoritmem, je možné k jejich ověření přistoupit pomocí jejich porovnání se všemi možnými konfiguracemi nebo v rámci delší simulační doby. Protože doba simulace jedné konfigurace procesních pravidel trvá přibližně 80 sekund, bylo výhodné distribuovat výpočty na více počítačů. Z tohoto důvodu jsem navrhl a realizovat výpočtový distribuční server (**ADAM Server**, není součástí aplikační rodiny ADAM). Tato konzolová aplikace je tvořena jako bezobslužná. Není v ní tedy možné navrhovat sítě ani modifikovat pravidla a omezení pro návrh regulace. Komunikuje pouze s aplikacemi typu ADAM, který je v tomto případě označen jako klient, při dodržení definované komunikační struktury. ADAM Server je schopen distribuovat časově náročné výpočty na připojené výpočetní stanice a výsledky potom předávat klientu.

Na server je zasílán soubor s definicí sítě a dále soubor s definicí jednotlivých procesních pravidel říditelných prvků a se seznamem sledovaných parametrů. Server jednotlivé výpočty distribuuje volné výpočtové stanice (ADAM GC), které zpětně posílají jen výsledky simulačních výpočtů. Porovnání je prováděno jen na straně serveru. Struktura zapojení serveru do výpočtů a ukázka hlavního okna serveru je na Obr. 31 a Obr. 32 .

Obsahový popis struktury aplikace ADAM Server

ADAM Server je tvořen jako konzolová více-vláknová aplikace v jazyce C# pro platformu .NET 4.5, která byla vyvíjena jako typický výpočtový monolitický „slave“ server. Sám o sobě žádné výpočty neiniculuje a nezpracovává, tudíž pracuje jen na základě požadavků aplikace ADAM, která se v tomto případě chová jako typická „klient“ aplikace. Aplikace jsem navrhl jako tří-vláknovou (kromě hlavního vlákna). Hlavní vlákno aplikace obsluhuje práci ostatních tří vláken (threads):

- **Vlákno pro komunikaci se zadavatelem (asynchronní):** úkolem tohoto vlákna je příjem úkolů od klientů ADAM NS. Komunikace je prováděna přes protokol TCP/IP v předem definovaném formátu (podrobný popis komunikace zde nebude uváděn).
- **Vlákno pro komunikaci s výpočtovým klientem (asynchronní):** úkolem tohoto vlákna je komunikace s pro tento důvod navržené klienty ADAM GC. Komunikace je prováděna přes protokol TCP/IP. Server práci rozděluje co nejrovnoměrněji mezi klienty, od kterých potom získává jen výsledky (rovnoměrnost rozdělení práce je zde založena pouze na počtu zaslaných zadání).
- **Vlákno pro porovnání výsledků:** úkolem tohoto vlákna je porovnávání výsledků získaných od všech připojených klientů. V paměti počítače je držena jen nejlepší konfigurace, ostatní jsou zapomenuty (což není z hlediska praktického použití šťastné řešení, nicméně lze tuto část aplikace upravit).

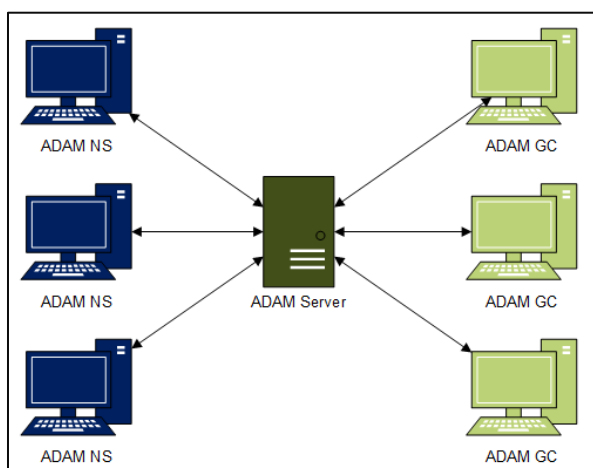
Obsahový popis struktury aplikace ADAM GC

Aplikace ADAM GC je konzolová aplikace, která výhradně komunikuje s aplikací ADAM Server. Komunikační porty jsou pevně stanoveny, stejně jako způsob komunikace (protokol TCP/IP) a formát posílaných souborů. Aplikace je tvořena jako dvouvláknová (první vlákno pro komunikaci; druhé vlákno pro výpočty). Výpočtové vlákno je schopno paralelizace

(jednotlivé simulace se navzájem neovlivňují), nicméně se ukázalo, že v aktuálním způsobu implementace paralelizace velké urychlení výpočtu nepřináší.

Bezpečnost komunikace

Komunikace mezi jednotlivými aplikacemi je tvořena pomocí protokolu TCP/IP. Je tedy možné výpočty distribuovat na server pomocí sítě internet. Z tohoto důvodu jsou soubory šifrovány, přičemž klíč k rozšifrování je součástí instalace ADAM NS a po úspěšné instalaci také zaveden do seznamu klíčů v aplikaci ADAM Server. Komunikace mezi ADAM Server a ADAM GC probíhá jen v rámci lokální sítě a není šifrována (viz, příloha C).



Obr. 31 Ilustrace distribuce výpočtu pomocí serveru



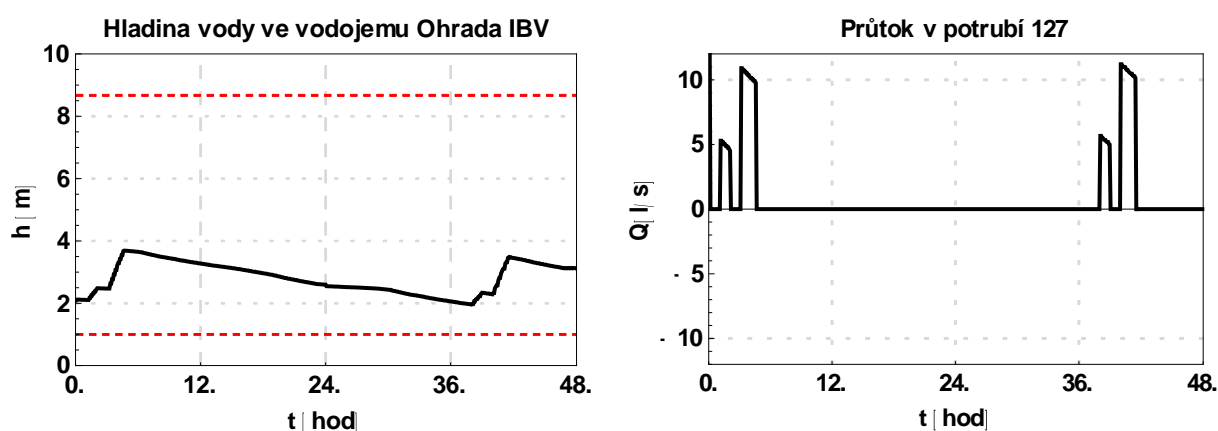
Obr. 32 Konzolová aplikace ADAM Server

12.1 Simulační ověření modelu

Ověření navržených procesních pravidel bylo provedeno pomocí ADAM Serveru, kdy byla hledána nejlepší řešení se stejnými omezeními, které jsou zmíněny v předchozí kapitole. Výsledky jsou zobrazeny v grafech 32 až 35. Simulační experimenty byly časově omezeny na v prvním případě na 4 hodiny, v druhém na 1 hodinu se stejnými počátečními podmínkami.

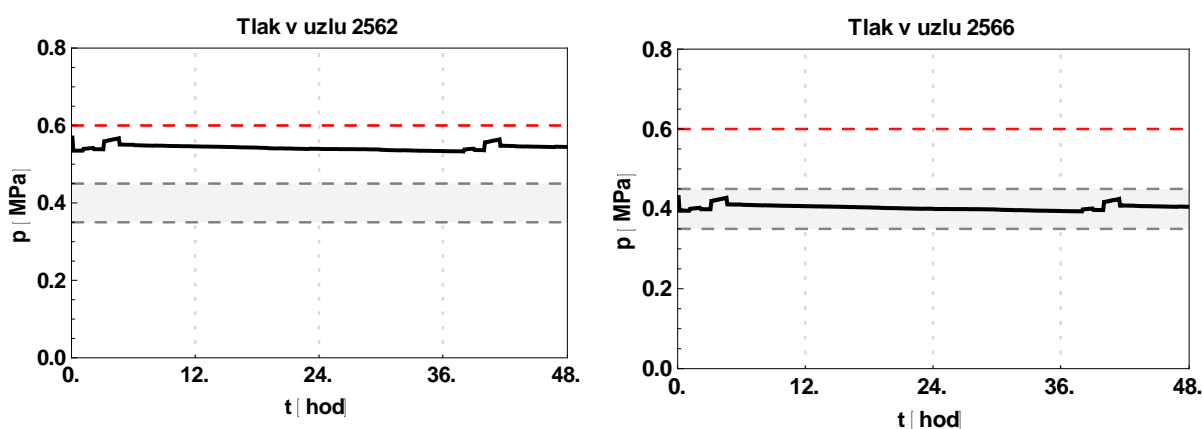
Test č. 1

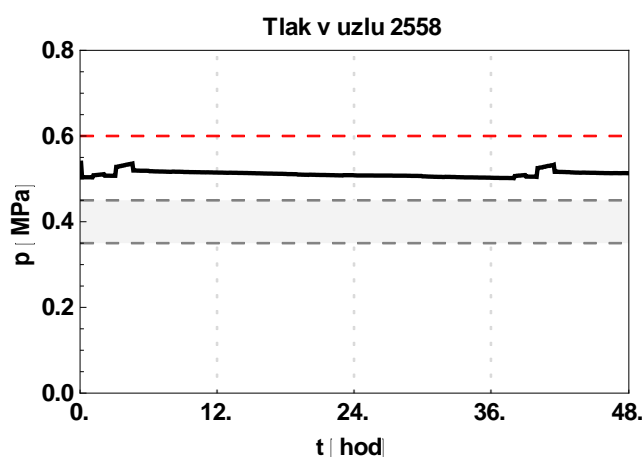
Doba výpočtu simulace v tomto případě byla omezena na 4 hodiny. Z výsledků je patrné, že dodávka pitné vody se v tomto případě přesunula z IBV Ohrady na připojenou část potrubní sítě, která zásobuje centrum města Vsetína (Obr. 33 , Obr. 34). V tomto případě se jedná o nechtěný důsledek, který je patrně zapříčiněn nedostatečně vymezenými pravidly simulace.



Obr. 33 Výsledky simulace: vlevo je zobrazen graf reprezentující výšku hladiny ve vodojemu IBV Ohrada v průběhu simulačního experimentu. Červené čárkované čáry představují minimální a maximální úroveň hladiny ve vodojemu. Vpravo je zobrazen graf reprezentující průtok v potrubí 127.

Z hlediska návrhu procesních pravidel při přihlédnutí k omezujícím podmínkám poměrně dobré řešení, nicméně v praxi je nežádoucí. Z tohoto důvodu je vhodné definovat další omezující podmínky, které by nalezení tohoto řešení jako vyhovujícímu zamezily.

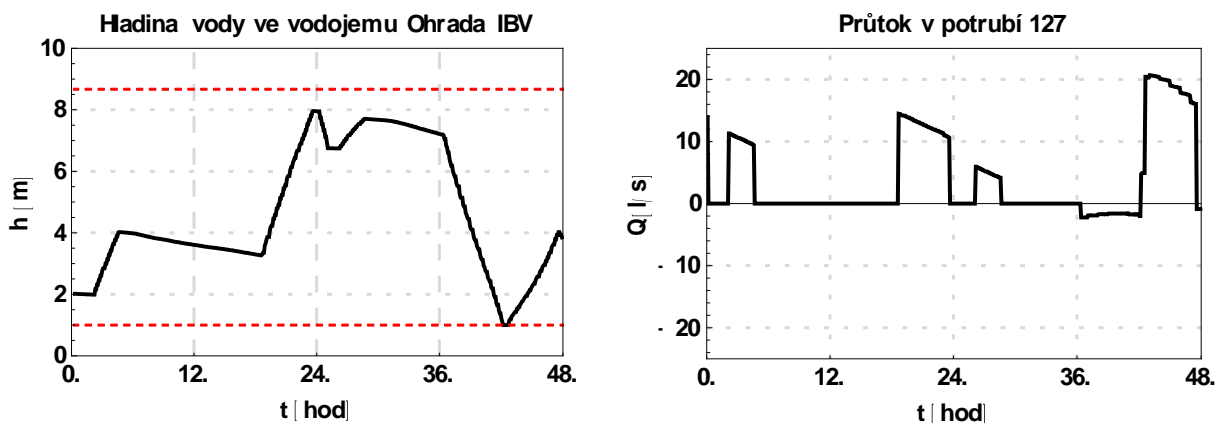




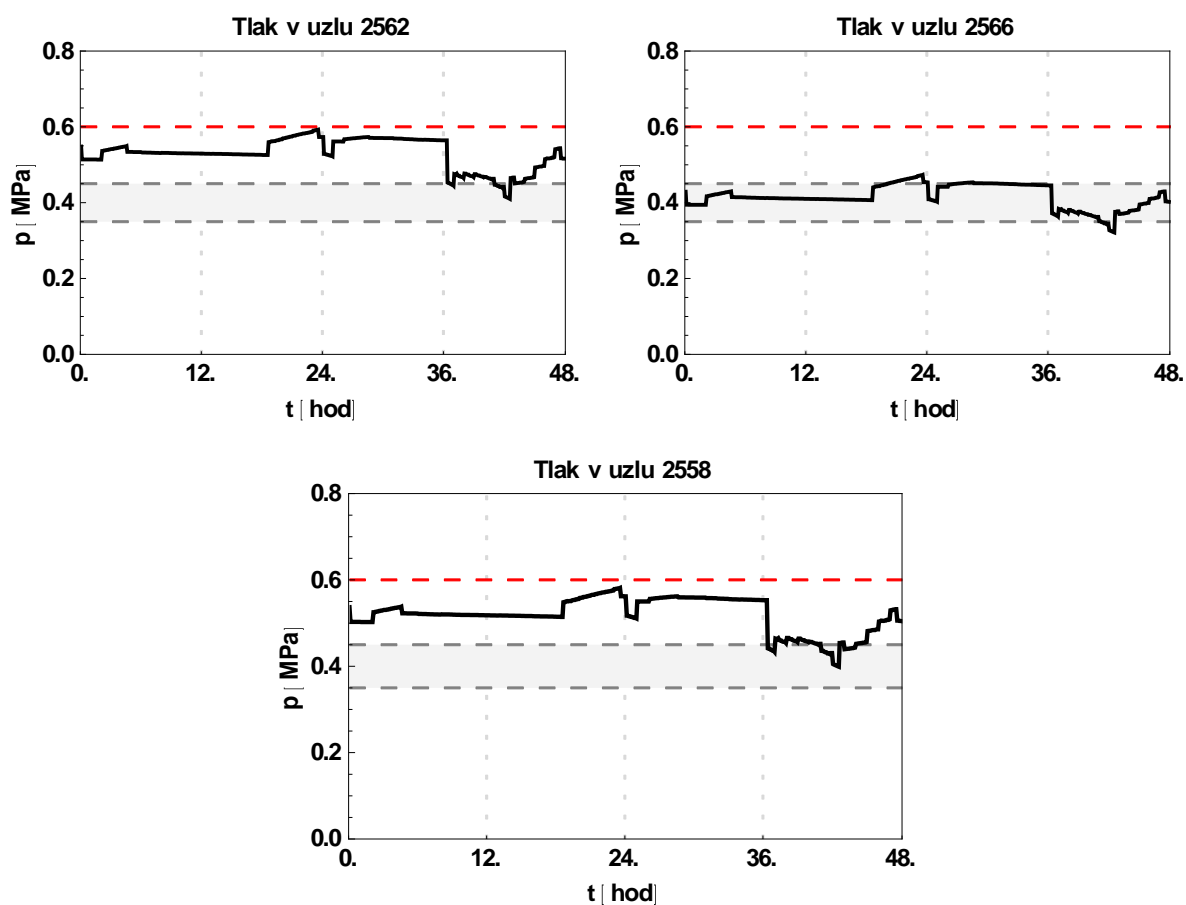
Obr. 34 Výsledky simulace - tlaky: vlevo nahoře uzel 2562, vpravo 2566 a dole 2588. Červená čárkovaná čára představuje hranici 0,6MPa. Šedá část grafu potom interval tlaků 0,35MPa až 0,45MPa.

Test č. 2

Doba výpočtu v tomto případě byla omezena na 1 hodinu. Omezující podmínka, kdy se musí čerpat maximálně 8,5 hodiny denně, byla vyměněna za podmínku, že se může čerpat kdykoliv v době, kdy se nečerpá do vodojemu Bečevná. Výsledky jsou podobné jako v předchozí kapitole, nicméně dochází k nežádoucímu poklesu hladiny ve vodojemu IBV Ohrada v 43 hodině simulačního experimentu (Obr. 35 ,Obr. 36). Také doba čerpání se prodloužila.



Obr. 35 Výsledky simulace: vlevo je zobrazen graf reprezentující výšku hladiny ve vodojemu IBV Ohrada v průběhu simulačního experimentu. Červené čárkované čáry představují minimální a maximální úroveň hladiny ve vodojemu. Vpravo je zobrazen graf reprezentující průtok v potrubí 127.



Obr. 36 Výsledky simulace - tlaky: vlevo nahoře uzel 2562, vpravo 2566 a dole 2588. Červená čárkovaná čára představuje hranici $0,6$ MPa. Šedá část grafu potom interval tlaků $0,35$ MPa až $0,45$ MPa.⁷

⁷ Simulační experimenty ukázané v práci by bylo vhodné rozšířit o podmínky spotřeby elektřiny, práce čerpadel v oblasti lepší účinnosti apod.

13 Přínosy práce

Předkládaná dizertační práce řeší problematiku regulace v tlakové hydraulické soustavě s využitím mechatronického přístupu. Přínosy práce lze rozdělit do tří základních skupin.

Teoretické přínosy práce

Hlavním teoretickým přínosem předkládané dizertační práce jsou:

- návrh metody pro regulaci tlaku, průtoku a výšky hladiny v soustavě čerpadlo-potrubí-nádrž jako součást širší hydraulické potrubní sítě,
- mechatronický přístup ke zpracování modelu hydraulické soustavy,
- vytvoření metodiky kalibrace sítě,
- vytvoření metodiky verifikace sítě.

Praktické přínosy práce

Jako hlavní praktický přínos lze označit vytvoření softwaru pro hydraulickou analýzu potrubních sítí – ADAM. Tento software již využívají v testovacím provozu pracovníci FAST VUT v Brně za účelem tvorby odkalovacích plánů vodovodních sítí. Na základě výsledků vytvořeného programu ADAM byly splněny dílčí cíle jejich projektů, např. TAČR.

Za důležité další praktické přínosy lze označit:

- implementaci metodiky kalibrace sítě,
- implementaci metodiky verifikace sítě,
- navržený algoritmus hledání procesních pravidel,
- vytvořený výpočetní server pro hydraulickou analýzu potrubních sítí.

Pedagogické přínosy práce

Jako hlavní pedagogický přínos předkládané dizertační práce je plánované použití softwaru ADAM pro pedagogické účely na Ústavu vodního hospodářství FAST VUT v Brně v rámci výuky konané v magisterských studijních programech.

Aplikace ADAM, která je dílčím výsledkem předkládané dizertační práce, je využitelná pro další pedagogickou činnost v rámci bakalářských a diplomových závěrečných prací z oblasti automatizace a informatiky, přičemž v rámci řešení předkládané dizertační práce vyvstaly nové problémy, které je možné dále řešit například v rámci VaV projektů. Dílčím přínosem předkládané dizertační práce je možnost rozšíření hydraulického řešiče aplikace ADAM (díky použité softwarové architektuře MVVM), případně jeho náhrada za jiný, a vytvoření tak nového nástroje například pro jiný typ analýzy tlakových potrubních sítí. Dalším potenciálním využitím aplikace ADAM je možnost implementace metod pro detekci úniků přenášeného média z potrubních sítí. Neposledním přínosem práce je vytvoření výpočetní serveru – ADAM Server a výpočtového klienta ADAM GC, jehož výpočetní jádro může být rovněž nahrazeno za jiné při zachování stejné komunikační struktury (např. Open Foam). Samozřejmě je možnost využití aplikací ADAM Server a ADAM GC v rámci výuky informatiky pro účely studia distribuovaných výpočtů.

14 Závěr

Hlavním cílem této dizertační práce byl návrh regulace průtoku a tlaku v soustavě čerpadlo-potrubí-nádrž, která je součástí širší tlakové potrubní sítě, za použití mechatronického přístupu. V návaznosti na formulaci teoretických východisek byla vytvořena řešeršní studie související s danou problematikou, na jejímž základě byla provedena analýza získaných poznatků a formulovány dílčí cíle práce.

První část práce představuje vytvoření modelu regulované soustavy pro účely hydraulické analýzy. Hydraulická analýza regulované potrubní sítě byla provedena za použití softwaru ADAM, který byl primárně pro tyto účely navržen a realizován. Aplikace ADAM byla naprogramována v jazyce C# pro platformu .NET 4.0, přičemž pro hydraulickou analýzu používá gradientní metodu. Vytvořená aplikace mimo jiné pracuje se zavedenými typy souborů, jako je INP soubor apod.

Vytvořený model tlakové potrubní sítě bylo nutné ověřit vůči měřeným hodnotám tlaku a průtoku na tlakové potrubní síti. Proces zvýšení přesnosti vytvořeného modelu tlakové potrubní sítě byl zformulován do metodiky kalibrace a verifikace. Tato metodika byla procesem algoritmizace implementována do aplikace ADAM v rámci toolboxu – ADAM Calibration Toolbox, který v sobě implementuje mimo jiné kalibrační pravidla a genetický algoritmus pro hledání parametrů modelu. Výstupem procesu kalibrace a verifikace by měl být věrohodný model reálné tlakové potrubní sítě, jehož platnost je vymezena metodou měření hydraulických veličin.

Návrh regulace tlaku, průtoku a výšky hladiny je dále formulován jako optimalizační problém, jehož řešení je hledáno pomocí genetického algoritmu. Výstupem je časové rozložení funkčnosti regulačních prvků soustavy, zejména čerpadel. Tento přístup byl také implementován v aplikaci ADAM. Regulační metodou navržená procesní pravidla byla tvořena pro tlakovou potrubní síť pro dopravu pitné vody města Vsetína, konkrétně pro částí sítě Prameniště Ohrada, vodojem Bečevná, vodojem Rokytnice a vodojem IBV Ohrada pro případ částečného výpadku dodávky z přehrady Karolinka.


Navržená regulační pravidla byla simulačně porovnávána s pravidly, která byla hledána pomocí optimalizační metody po delší časový úsek řešení. K tomuto účelu byl vytvořen výpočetní server ADAM Server, jehož primárním úkolem je distribuce zdlouhavých výpočtů na spolupracující pracovní stanice. Navržená procesní pravidla respektují obecné požadavky provozovatelů potrubních sítí pro dodávku pitné vody, přičemž primárně odrážejí důraz na zvýšení spolehlivosti provozované tlakové potrubní sítě.

Seznam použité literatury

- [1] International Energy Agency, World Energy Outlook 2009, [citováno 14.8.2013] <http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebiste/2009/WEO2009.pdf>
- [2] de ALMEIDA, A.T., FERREIRA, F.J.T.E., FONG, J., FONSECA, P., EUP Lot 11 Motors, ISR - University of Coimbra, 2008, [cit. 14.8.2013] http://www.ebpg.bam.de/de/ebpg_medien/011_studyf_08-04_motors_updated.pdf
- [3] „VDI 2206 Design methodology for mechatronics systems“ 2002
- [4] HADAŠ, Z., VETIŠKA, V., SINGULE, V., ANDRŠ., O., KOVÁŘ, J., VETIŠKA, J., Energy Harvesting from Mechanical Shocks Using A Sensitive Vibration Energy Harvester, International journal of Advanced Robotic Systems, INTECH, 2012
- [5] VETIŠKA, J., Analýza stability řezného procesu obráběcího stroje vzhledem k samobuzenému kmitání, Ph.D. práce, VUT Brno, 2013
- [6] LIPPAI, I., WRIGHT, L., Criticality analysis case study: zone 7 water distribution system, ASCE Pipeline Conference, 2005
- [7] RICO-RAMIREZ, V., FRAUSTO-HERNANDEZ, S., DIWEKAR, U.M., HERNANDEZ-CASTRO, S., Water networks security: A two-stage mixed-integer stochastic program for sensor placement under uncertainty, Computers & Chemicals Engineering, 2007
- [8] MABE, W. J., US Patent 5240380: Variable speed control for centrifugal pumps
- [9] BERTHELSEN, L. H., US Patent 8019479: Control algorithm of variable speed pumping systém
- [10] GRENN, CH. W., US Patent 3918831: Centrifugal pump with variable impeller
- [11] ROBB, G. A., a kol., US Patent 2004/0064,292: Control systém for centrifugal pumps
- [12] MOORE, T. A., a kol., US Patent 4257745: Automatic control systém of centrifugal pumps
- [13] CEMBRANO, G., WELLS, G., QUEVEDO, J., PÉREZ, R., ARGELAGUET, R., Optimal control of a water distribution network in a supervisory control system, Control Engineering Practice, Elsevier, 2000
- [14] CHANG, T., Robust model predictive control of water quality in drinking water distribution systems, University of Birmingham, 2003
- [15] LAI, D., SCHAAKE, J.C., Linear programming and dynamic programming application to water distribution network design, MIT Hydrodynamica Laboratory, Cambridge, 1969
- [16] KOHLHASS, C., MATTERN, D.E., An algorithm for obtaining optimal looped pipe distribution networks, Papers of the 6th annual symposium on the application of computers to the problems of urban society, New York, 1971
- [17] ALPEROVITS, E., SHAMIR, U., Design of optimal water distribution systems, Water resources research, 1977
- [18] ORMSBEE, L., LINGIREDDY, S., CHASE, D., Optimal pump scheduling for water distribution systems, Multidisciplinary international conference on scheduling: theory and application, Dublin, Ireland, 2009
- [19] ERTIN, E., DEAN, A.N., MOORE, M.L., PRIDDY, K.L., Dynamic optimization for optimal control of water distribution systems, Proc. SPIE, 2001
- [20] CROSS, H., Analysis of flow in networks of conduits or conductors, Bulletin no. 286, Engineering experiment station, University of Illinois, 1936
- [21] SHAMIR, R., HOWARD, C.D.D., Water Distribution Systems, Analysis, Proc ASCE, 1968
- [22] FIETZ, T.R., Hydraulic network analysis using linear theory, ASCE

- [23] EPP, R., FOWLER, A.G., Efficient code for steady state flows in networks, Journal of the hydraulic division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1970
- [24] HAMAM, Y. M., BRAMPELLER, A., Hybrid method for the solution of piping networks, Proceedings Institution of Electrical Engineers, vol., 118, no.11
- [25] WOOD, D.J., CHARLES, C.O.A., Hydraulic network analysis using linear theory, Journal of the hydraulic division ASCE, vol.98, no. hy7
- [26] CHANDRASHEKAR, M., Extended set of components in pipe networks, Journal of the hydraulic division, ASCE, vol. 106, no. hy1
- [27] JEPPSON, R.W., DAVIS, A.L., Pressure reducing valves in pipe network analysis, Journal of the hydraulic division, ASCE, vol. 102, no. hy7
- [28] RAO, C.R., BREE, D.W., Extended period simulation of water systems – Part A, Journal of the hydraulic division, ASCE, vol. 103, no. hy2
- [29] TODINI, E., PILATI, S., A gradient algorithm for the analysis of pipe networks, Computer applications in water supply, Tauton, UK
- [30] IFTEKHAR, A., Application of the gradient method for the analysis of unsteady flow in water networks, Ph.D. práce, The University of Arizona, 1997
- [31] BRDYS, M.A., ULANICKY, B., Operational control of water systems: structures, algorithms and applications, UK Prentice-Hall International
- [32] COULBECK, B., Optimization and modelling techniques in dynamic control of water distribution systems, Ph.D. práce, University of Sheffield, UK
- [33] FARMANI, R., INGEDUHL, P., SAVIC, D., WALTERS, G., SVITAK, Z., BERKA, J., Real-time modelling of a major water supply system, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Water management, 2006
- [34] BRDYS, M., CREEMERS, T., GOOSSENS, H., RIERA, J., HEINSBROEK, A., LISIAK, Z., „CLOCWiSe“: Constraint Logic for Operational Control of Water Systems, 26th Water Resources Planning and Management Conference, ASCE, Control Theory
- [35] JAMIESON, D. G., SHAMIR, U., MARTINEZ, F., FRANCHINI, M., Conceptual design of a generic, real-time, near-optimal control system for water distribution networks, Journal of Hydroinformatics, 2007
- [36] MURPHY, L. J., SIMPSON, A. R., DANDY, G. C., Pipe Network Optimization using an Improved Genetic Algorithm, Research Report No. R 109, University of Adelaide
- [37] SAKARYA, A.B.A., MAYS, L.W., Optimal operation of water distribution pumps considering water quality, J Water Resour Plan Manage, ASCE
- [38] OMRSBEE, L.E., WALSKI, T.M., CHASE, D.V., SHARP, W.W., Methodology for improving pump operation efficiency, J Water Resour Plan Manage, ASCE
- [39] van ZYL, J.E., SAVIC, D.A., WALTERS, G.A., Operational optimization of water distribution systems using a hybrid genetic algorithm, J Water Resour Plan Manage, ASCE
- [40] GOLDMAN, F.E., MAYS, L.W., Chapter 5 Water distribution system operation: application of simulated annealing, Water resources systems management tools, McGraw-Hill, New York
- [41] TSAI, F. T.-C., KATIYAR, V., TOY, D., GOFF, R.A., Conjunctive Management of Large-Scale Pressurized Water Distribution and Groundwater Systems in Semi-Arid Area with Parallel Genetic Algorithm, Water Resour Manage, 2009
- [42] SIMPSON, A., LANSEY, K.E., CHOI, CH.Y., OSTFELD, A., PEPPER, I.L., Comparing the Q-Equations and Todini-Pilati Formulation for Solving the Water Distribution System Equations, Proceedings of ASCE, 2010

- [43] INGEDULD, P., VYČÍTAL, J., Matematické modelování sítí (všechny části)
- [44] LEE, M.-F., Pipe network analysis, Master degree thesis, University of Florida
- [45] NEWBOLD, J.R., Comparison and Simulation of a Water Distribution Network in EPANET and a New Generic Graph Trace Analysis Based Model, Master degree thesis, Blackburn, 2009
- [46] SALGADO-CASTRO, R., O., Computer modelling of water supply distribution networks using the gradient method, Volume One & Two, Ph.D. thesis, Newcastle university
- [47] MikeNet and EPANET Methodology, Rossman
- [48] MAYS, L.W., Water Distribution System Handbook
- [49] DUNLOP, E.J., WADI Users Manual, Local Government Computer Services board, Dublin, Ireland
- [50] MAYS, L.W., Reliability analysis of water distribution systems, ASCE Publications, 1989
- [51] VICE, R., SIDDIQI, M.S., MVVM Survival Guide for Enterprise Architecture in Silverlight and WPF, London, Packt Publishing, 2012
- [52] GUTH, N., KLINGEL, P., Demand Allocation in Water Distribution Network Modelling – A GIS-Based Approach Using Voronoi Diagrams with Constraints, Application of Geographic Information Systems - Chapter 15, INTECH, 2012
- [53] RUCKA, J., Mapa maximálních/minimálních tlaků ve vodovodní síti města Vsetín, GIS VaK vsetín – dostupné prostřednictvím intranetu Vsetín [cit. 2012-9-22]
- [54] RUCKA, J., KOVAR, J., Prevention of discoloration events in water distribution systems, 12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, CCWI 2013, IN PRESS
- [55] KOVAR, J.; RUCKA, J. Software Tool for Calibration of Hydraulic Models of Water- Supply Networks. In *Mechatronics 2013 Recent Technological and Scientific Advances*. 1. London: Springer, 2013. s. 253-258.
- [56] WU, Z.Y., Optimal calibration method for water distribution water quality model, Journal of Environmental Science and Health, Part A, LESA, 2006
- [57] SHAMIR, U., Optimal design and operation of water distribution system, Water Resources Research 10, pp. 27-36
- [58] LANSEY, K. E., BASNET, C., Parameter estimation for water distribution networks, Journal of Water Resources Planning and Management 117
- [59] REDDY, P.V.N., SRIDHARAN, K., RAO, P.V., WLS method for parameter estimation in water distribution networks, Journal of Water Resources Planning and Management 122
- [60] DATTA, R.S.N., SRIDHARAN, K., Parameter estimation in water-distribution systems by least squares, Journal of Water Resources Planning and Management 120
- [61] PUDAR, R.S., LIGGET, J.A., Leaks in pipe network, Journal of Hydraulic Engineering 118
- [62] OMRSBEE, L. E., Implicit network calibration, Journal of Water Resources Planning and Management 115
- [63] GOLDBERG, D.E., Genetic algorithms in search, optimisation and machine learning, Addison, Wesley, Reading, Massachusetts
- [64] SAVIC, D.A., WALTERS, G.A., Genetic algorithm techniques for calibrating networks models, Tech. Rep., 95/12, University of Exeter, UK
- [65] KAPELAN, Z., Calibration of water distribution systems hydraulic models, Ph.D. práce, University of Exeter, UK

- 
- [66] VITKOVSKY, J.P., LIGGET, J.A., SIMPSON, A.R., LAMBERT, M.F., Leak detection and calibration using transients and genetic algorithm, Tech. Rep. R 157, University of Adelaide
- [67] SAVIC, D.S., KAPELAN, Z.S., JONKERGOUW, P.M.R., Qua vadis water distribution model calibration?, Centre of Water Systems, University of Exeter, UK
- [68] LANSEY, K., EL-SHORBAGY, W., AHMED, I., ARAUJO, J., HAAN, C, Calibration Assessment and Data Collection for Water Distribution Networks, J. Hydraulics Eng., 127(4), 270-279
- [69] RUCKA, J., Měřicí hydrantový nástavec, Průmyslový vzor, VUT v Brno, 2012
- [70] RUCKA, J., Měřicí nástavec na podzemní vodovodní hydrant, Užitný vzor, VUT v Brno, 2012

Seznam obrázků

Obr. 1	a) Mikro-cyklus [5]; b) Makro-cyklus [5]	12
Obr. 2	a) Model potrubní sítě Wolf-Cordera Ranch, Colorado Springs [6]; b) Model malé potrubní sítě [7]	14
Obr. 3	US Patent č 5 240 380 [8].....	15
Obr. 4	a) Obecná struktura regulační soustavy [13] (podobně [14])	16
Obr. 5	Ukázka nalezeného řešení pro hydraulickou soustavu z [18].....	18
Obr. 6	Obecná struktura optimalizace pro účely návrhu parametrů regulační soustavy [18] 18	
Obr. 7	a) Zobrazení modelu potrubní sítě pro oblast Žďárska a Třebíčska. Celá síť měří 550 km a zásobuje pitnou vodou 180 000 obyvatel [33] b) Porovnání měřených a vypočtených hodnot [33]	21
Obr. 8	Struktura regulační soustavy (převzato a upraveno z [35]);.....	22
Obr. 9	Čas potřebný pro výpočet regulačních pravidel X [41]	23
Obr. 10	Q-H charakteristika čerpadla [30] nebo [48]	31
Obr. 11	Software Adam NV (alpha verze)	36
Obr. 12	MVVC model použitý v tvorbě aplikace ADAM [51]	38
Obr. 13	Základní struktura softwaru Adam NV (alpha verze)	39
Obr. 14	Možnosti importu dat do softwaru ADAM NS	40
Obr. 15	Ukázka skeletonizace sítě (převzato a upraveno z [52]).....	42
Obr. 16	Zobrazení modelu potrubní sítě města Vsetín s podkladovou mapou a bez podkladové mapy (ortofotomapa) v aplikaci ADAM NS	44
Obr. 17	Zobrazení potrubní sítě města Vsetín – rozmístění vodojemů (nádrží), rozmístění reservoárů	45
Obr. 18	Zobrazení potrubní sítě města Vsetín - rozmístění čerpadel, rozmístění potrubí ..	45
Obr. 19	Měřidlo tlaku a průtoku [69], [70]	53
Obr. 20	Měřidlo tlaku (BD SENSORS – DMP 331), Datalogger – Sensus Metering Systems – CLD (2U) [69], [70].....	54
Obr. 21	Příklad měřených dat, která lze importovat (vlevo zobrazeny data ze souboru typu CSV, ve středu mezerami oddělená data ze souboru TXT, vpravo data ze souboru XLS, XLSX)	54
Obr. 22	Mapa potrubní sítě zobrazená v aplikaci ADAM NS	55
Obr. 23	Měření průtoku (VDJ Rokytice) – odběr Lhotka (13.3.2009) a) minimální b) průměrná c) maximální	56
Obr. 24	Měření průtoku (VDJ Bečevná) – odběr Vsetín DTP (13.3.2009) a) minimální b) průměrná c) maximální	56
Obr. 25	Porovnání měřených a vypočtených dat	57
Obr. 26	Porovnání měřených a vypočtených dat	57
Obr. 27	a) Mapa části tlakové potrubní sítě pro dopravu pitné vody města Vsetína [53]; b) Stejná část potrubní sítě zobrazena v aplikaci ADAM NS.....	60
Obr. 28	Mapa regulované soustavy v zobrazená v softwaru ADAM NS. Vlevo nahoře je zvýrazněn přítok pitné vody z přehrady Karolinka přivaděčem Stanovnice. Vpravo nahoře je zvýrazněna hlavní část regulované soustavy.	60
Obr. 29	Výsledky simulace: vlevo je zobrazen graf reprezentující výšku hladiny ve vodojemu IBV Ohrada v průběhu simulačního experimentu. Červené čárkované čáry představují minimální a maximální úroveň hladiny ve vodojemu. Vpravo je zobrazen graf reprezentující průtok v potrubí 127, z kterého lze usuzovat na vektor X	62
Obr. 30	Výsledky simulace - tlaky: vlevo nahoře uzel 2562, vpravo 2566 a dole 2588. Červená čárkovaná čára představuje hranici 0,6MPa. Šedá část grafu potom interval tlaků	

0,35MPa až 0,45MPa.	63
Obr. 31 Ilustrace distribuce výpočtu pomocí serveru	65
Obr. 32 Konzolová aplikace ADAM Server	65
Obr. 33 Výsledky simulace: vlevo je zobrazen graf reprezentující výšku hladiny ve vodojemu IBV Ohrada v průběhu simulačního experimentu. Červené čárkované čáry představují minimální a maximální úroveň hladiny ve vodojemu. Vpravo je zobrazen graf reprezentující průtok v potrubí 127.	66
Obr. 34 Výsledky simulace - tlaky: vlevo nahoře uzel 2562, vpravo 2566 a dole 2588. Červená čárkovaná čára představuje hranici 0,6MPa. Šedá část grafu potom interval tlaků 0,35MPa až 0,45MPa.	67
Obr. 35 Výsledky simulace: vlevo je zobrazen graf reprezentující výšku hladiny ve vodojemu IBV Ohrada v průběhu simulačního experimentu. Červené čárkované čáry představují minimální a maximální úroveň hladiny ve vodojemu. Vpravo je zobrazen graf reprezentující průtok v potrubí 127.	67
Obr. 36 Výsledky simulace - tlaky: vlevo nahoře uzel 2562, vpravo 2566 a dole 2588. Červená čárkovaná čára představuje hranici 0,6MPa. Šedá část grafu potom interval tlaků 0,35MPa až 0,45MPa.	68
Obr. 37 SCADA reprezentace regulovaného systému - vlevo VDJ Bečevná, vpravo VDJ Rokytnice	79
Obr. 38 Zobrazení potrubní sítě obce Kateřinky s podkladovou mapou a bez podkladové mapy	80
Obr. 39 Zjednodušený sekvenční diagram znázorňující distribuci výpočtů pomocí aplikace ADAM Server a ADAM GC	81
Obr. 40 Zjednodušený sekvenční diagram znázorňující distribuci výpočtů mezi aplikací ADAM Server a ADAM GC	82

Seznam tabulek

Tab 1.	Obecný algoritmus výpočtu.....	30
Tab 2.	Vyjádření f_D	32
Tab 3.	Příklad parametru K u jednotlivých objektů sítě [48][50].....	34
Tab 4.	Základní sumarizace potrubní sítě pro dopravu vody města Vsetína	44
Tab 5.	Algoritmus pro hledání tlakových rozdílů	50
Tab 6.	Algoritmus pro hledání tlakových rozdílů	50
Tab 7.	Algoritmus pro hledání zavřených potrubí	50
Tab 8.	GA pro hledání parametrů jednoho potrubí	51
Tab 9.	Základní parametry použité měřicí aparatury.....	53
Tab 10.	Upravený algoritmus výpočtu.....	59
Tab 11.	Parametry vodojemů IBV Ohrada.....	61
Tab 12.	Parametry vodojemu Bečevná	61
Tab 13.	Parametry vodojemu Rokytnice.....	61
Tab 14.	Sumarizace potrubní sítě obce Kateřinice.....	80

Seznam příloh

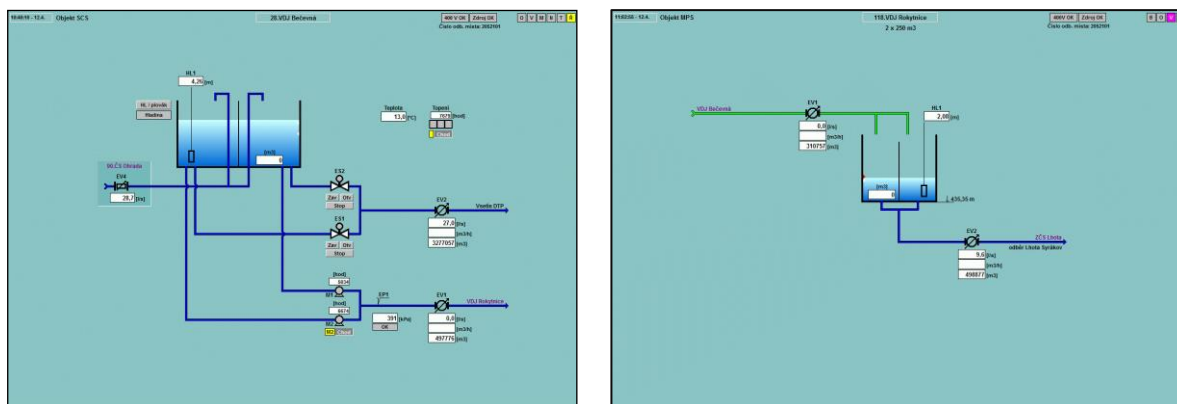
Příloha A – Doplnující data pro model potrubní sítě pro dopravu pitné vody Vsetín

Příloha B – Model potrubní sítě pro dopravu pitné vody pro obec Kateřinice

Příloha C – Sekvenční diagramy

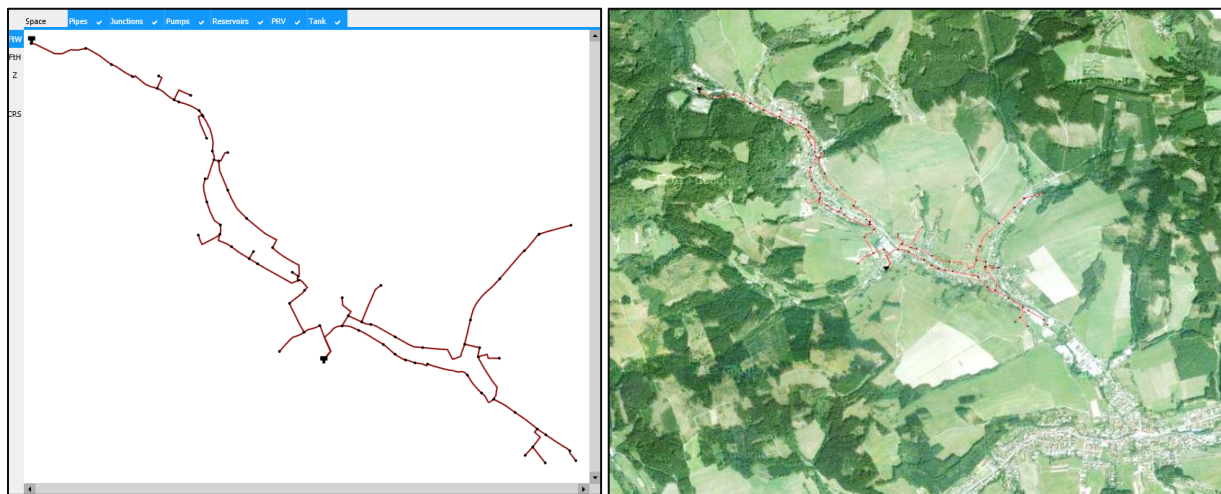
Příloha D – Datový nosič s digitální verzí práce

Příloha A – Doplnující data pro model potrubní sítě pro dopravu pitné vody Vsetín



Obr. 37 SCADA reprezentace regulovaného systému - vlevo VDJ Bečevná, vpravo VDJ Rokytnice

Příloha B – Model obce Kateřinice



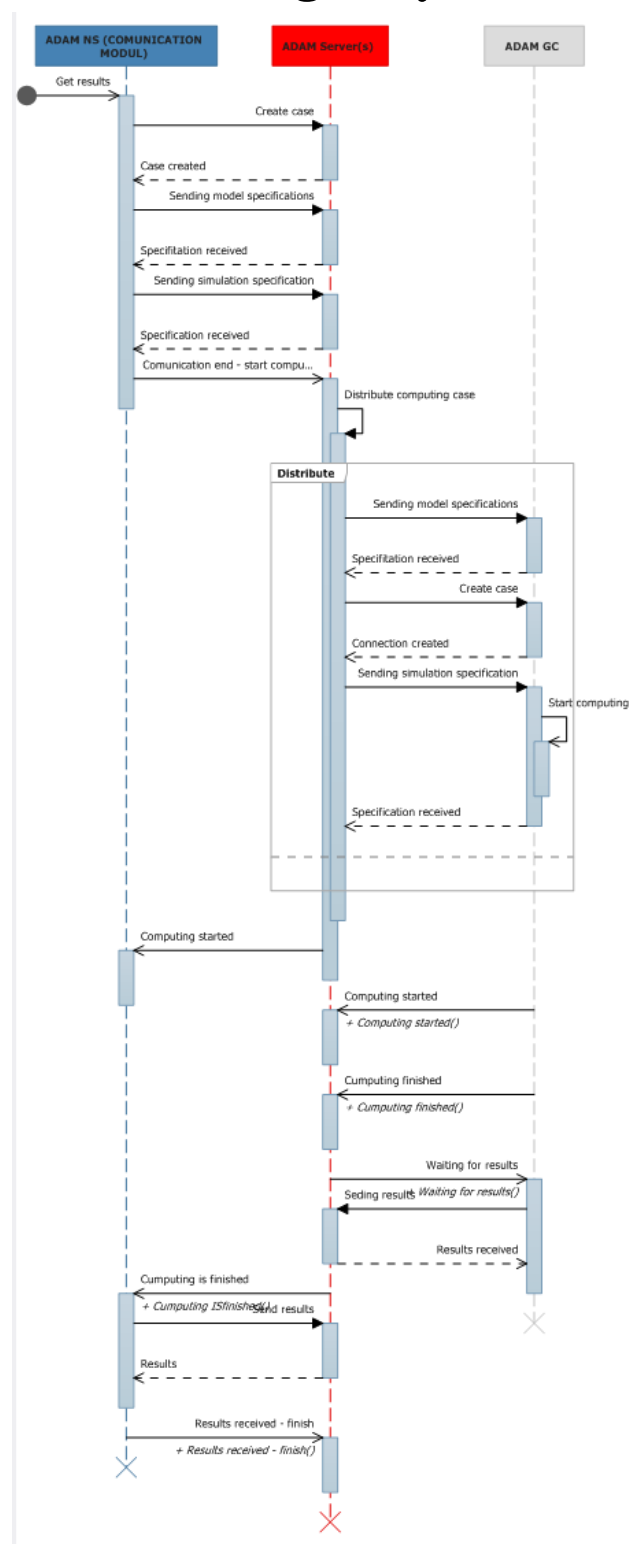
Obr. 38 Zobrazení potrubní sítě obce Kateřinky s podkladovou mapou a bez podkladové mapy

Potrubní síť slouží k dodávání pitné vody pro město Vsetín a přilehlé obce. Celkové rozmístění jednotlivých prvků potrubní sítě je ukázáno na Obr. 16 . Celková sumarizace potrubní sítě je v Tab. 14. Celá potrubní síť byla vypracována dle zadávací dokumentace.

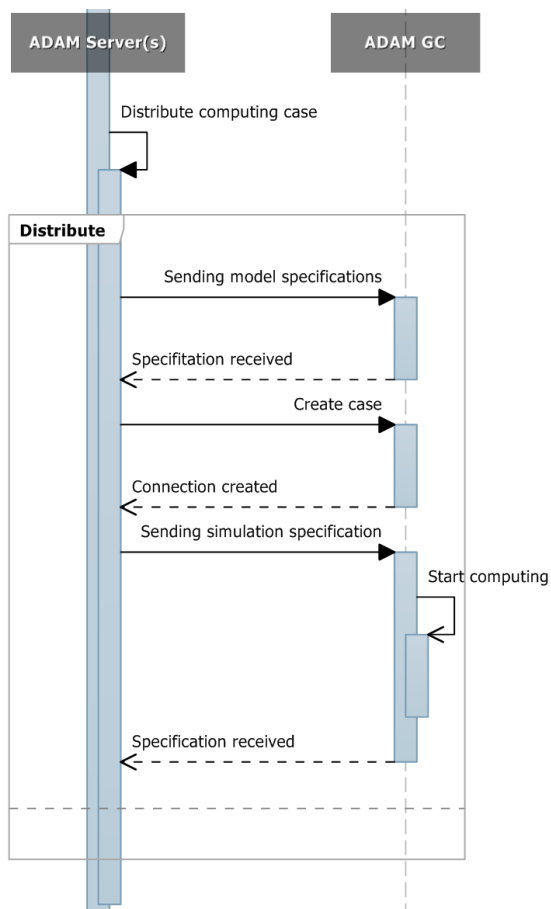
Tab. 14. Sumarizace potrubní sítě obce Kateřinice

Celková délka potrubí:	8 549,89 m
Počet potrubí:	77
Počet čerpadel:	0
Počet reservoárů:	0
Počet nádrží/vodojemů:	2

Příloha C – Sekvenční diagramy



Obr. 39 Zjednodušený sekvenční diagram znázorňující distribuci výpočtů pomocí aplikace ADAM Server a ADAM GC



Obr. 40 Zjednodušený sekvenční diagram znázorňující distribuci výpočtů mezi aplikací ADAM Server a ADAM GC